



TUGAS AKHIR - MO141326

**STUDI ANALITIS, NUMERIK DAN EKSPERIMEN  
OLAH GERAK DAN DINAMIKA TEGANGAN  
SISTEM TAMBAT *TAUT* SPAR DENGAN  
VARIASI POSISI *FAIRLEAD* RELATIF  
TERHADAP *CENTER OF GRAVITY***

SALMAN YANUAR DWISATYA

NRP. 4313 100 085

Dosen Pembimbing :

Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.

Ir. Murdjito, M.Sc.Eng.

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 60111

2017



FINAL PROJECT - MO141326

# ANALYTICAL, NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES OF MOTION RESPONSES AND DYNAMIC TENSION OF TAUT MOORING SYSTEM WITH VARIATION OF FAIRLEAD POSITION RELATIVE TO THE CENTER OF GRAVITY

SALMAN YANUAR DWISATYA

NRP. 4313 100 085

Supervisors :

Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.

Ir. Murdjito, M.Sc.Eng.

DEPARTMENT OF OCEAN ENGINEERING

Faculty of Marine Technology

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 60111

2017



**STUDI ANALITIS, NUMERIK DAN EKSPERIMEN OLAH GERAK DAN  
DINAMIKA TEGANGAN SISTEM TAMBAT *TAUT* SPAR DENGAN  
VARIASI POSISI *FAIRLEAD* RELATIF TERHADAP *CENTER OF  
GRAVITY***

**LEMBAR PENGESAHAN  
TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada Program Studi S-1 Departemen Teknik Kelautan  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**SALMAN YANUAR DWISATYA**

NRP. 4313 100 085

Disetujui oleh

1. Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D. .... (Pembimbing 1)
2. Ir. Murdjito, M.Sc.Eng. .... (Pembimbing 2)
3. Dr.Eng. Rudi W. Prastianto, S.T., M.T. .... (Penguji)
4. Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D. .... (Penguji)
5. Ir. Mas Murtedjo, M.Eng. .... (Penguji)

SURABAYA, AGUSTUS 2017



**STUDI ANALITIS, NUMERIK DAN EKSPERIMEN OLAH GERAK DAN  
DINAMIKA TEGANGAN SISTEM TAMBAT *TAUT* SPAR DENGAN  
VARIASI POSISI *FAIRLEAD* RELATIF TERHADAP *CENTER OF  
GRAVITY***

Nama : Salman Yanuar Dwisatya  
NRP : 4313 100 085  
Jurusan : Teknik Kelautan FTK – ITS  
Dosen Pembimbing : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, MSc., Ph.D.  
Ir. Murdjito, M.Sc.Eng

**Abstrak**

SPAR (*Single Point Anchor Reservoir*) merupakan bangunan yang dirancang berupa silinder yang besar dan panjang. Stabilitas SPAR dapat dicapai dengan filosofi pengaturan titik berat (COG) dari bangunan tersebut harus berada di bawah titik *buoyancy* nya (COB). Selain itu, sistem tambat juga ditambahkan pada SPAR untuk membatasi respon gerakan *heave*, *pitch*, dan *surge* yang terjadi akibat beban angin, arus, dan gelombang ketika beroperasi di laut lepas. Akan tetapi, dibutuhkan konfigurasi tali tambat yang optimal untuk mengakomodasi gerakan SPAR agar aktivitas yang berjalan di *deck* tidak terganggu. Dalam penelitian ini dilakukan studi yang ditinjau secara analitis, numerik dan eksperimen terhadap model SPAR (skala 1:125) di Laboratorium Hidrodinamika ITS pada kondisi terapung bebas dan tertambat dengan variasi posisi fairlead terhadap titik pusat massa (1.5 VCG, 1.25 VCG, dan 1 VCG) untuk mengetahui respon gerak dalam bentuk RAO dan tegangan tali dalam bentuk *Tension Operator*. Berdasarkan hasil penelitian, RAO gerakan model antara kondisi terapung bebas dan tertambat memiliki perubahan yang signifikan di setiap gerakan *heave*, *pitch* dan *surge*. Pada setiap variasi posisi *fairlead*, respon gerak dan tegangan tali tambat yang dihasilkan semakin menurun ketika posisi *fairlead* mendekati titik *center of gravity*. Tetapi frekuensi resonansi dari sistem berubah secara konsisten dari variasi pertama hingga terakhir.

**Kata kunci:** SPAR, sistem tambat, elevasi *fairlead*, respon gerak, tegangan tali tambat.



**ANALYTICAL, NUMERICAL, AND EXPERIMENTAL STUDIES OF  
MOTION RESPONSES AND DYNAMICS TENSION OF TAUT  
MOORING SYSTEMS WITH VARIATION OF FAIRLEAD POSITION  
RELATIVE TO THE CENTER OF GRAVITY**

Name : Salman Yanuar Dwisatya  
NRP : 4313 100 085  
Department : Ocean Engineering  
Supervisor : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.  
Ir. Murdjito, M.Sc.Eng.

**Abstract**

SPAR (Single Point Anchor Reservoir) is a building designed in the form of large and long cylinder. SPAR stability can be achieved with controlling the center of gravity (COG) of the building must be below its center of buoyancy (COB). Moreover, the mooring system is also added to the SPAR to limit the response of heave, pitch, and surge movements that occur due to any environmental loads. However, an optimal moor rope configuration is required to accommodate SPAR motion to keep the activity running on the deck undisturbed. In this study, an analytical, numerical, and experimental study of SPAR model (scale 1:125) was performed at the Hydrodynamics Laboratory ITS. This study performed on free and moored floating conditions with variation of fairlead position to the center of gravity (1.5 VCG, 1.25 VCG and 1 VCG) to find out the motion response in the form of RAO and tension response in the form of Tension Operator. Based on the results of the research, RAO motion model between free and tethered floating conditions has significant changes in each heave, pitch, and surge motions. In each variation of the fairlead position, the result shows that motion response and mooring tension decreases as the fairlead approaches the center of gravity. But the resonance frequency of the system changes consistently to the higher frequency from the variation 1.5 VCG to 1 VCG.

**Keywords:** SPAR, mooring system, fairlead elevation, motion responses, mooring tension





## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT karena atas rahmat dan hidayah yang telah diberikan oleh-Nya, penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan tepat waktu.

Tugas Akhir merupakan salah satu syarat dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik Kelautan. Tugas akhir ini berjudul “Studi Analitis, Numerik dan Eksperimen Olah Gerak dan Dinamika Tegangan Sistem Tambat *Taut* SPAR Dengan Variasi Posisi *Fairlead* Relatif Terhadap *Center of Gravity*”. Tugas akhir ini membahas tentang respon gerak dan tegangan tali tambat yang ditinjau secara analitis, numerik dan eksperimen pada kondisi SPAR terapung bebas dan tertambat. Adanya laporan tugas akhir ini diharapkan dapat menambah pengetahuan dan menjadi referensi untuk penelitian berikutnya.

Dalam pengerjaan laporan tugas akhir ini, penulis menyadari bahwa masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk menyempurnakan penelitian berikutnya.

Demikian laporan ini disusun, semoga dapat bermanfaat bagi penulis, pembaca serta peneliti selanjutnya.

Surabaya, 18 Juli 2017

Salman Yanuar Dwisatya



## **UCAPAN TERIMA KASIH**

Pada pengerjaan Tugas Akhir ini, penulis banyak mendapatkan bimbingan dan bantuan dari banyak pihak yang terkait. Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terimakasih diantaranya kepada:

1. Prof. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D selaku dosen pembimbing 1 yang telah memberikan banyak pembelajaran selama kuliah di Teknik Kelautan.
2. Ir. Murdjito, M.Sc selaku dosen pembimbing 2 yang telah banyak pengetahuan selama proses pengerjaan Tugas Akhir ini.
3. Kedua orang tua penulis yang selalu memberikan doa dan dukungan.
4. Rekan-rekan satu topik tugas akhir eksperimen SPAR yaitu Ivandito, Irza, Arif, dan Naufal yang telah membantu dan saling mendukung satu sama lain dalam pengerjaan tugas akhir ini.
5. Bapak Condro dan Mas Rudi selaku teknisi Laboratorium Hidrodinamika ITS yang telah memberikan bantuan berupa kritikan dan nasehat yang membangun dalam pengerjaan tugas akhir ini.
6. Muhammad Arifin dan Arif (Pakde) mahasiswa departemen teknik elektro ITS yang telah membantu dalam pemrograman di setiap instrumen pengukuran.
7. Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen wali yang selalu memberikan arahan dan nasehat dalam menjalani perkuliahan selama 8 semester ini.
8. Rekan-rekan pengurus Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS dan Valtameri yang selalu memberikan bantuan dan semangat dalam menjalani perkuliahan selama 8 semester ini.



## DAFTAR ISI

COVER	
HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
ABSTRAK .....	v
ABSTRACT .....	vii
KATA PENGANTAR .....	ix
UCAPAN TERIMA KASIH .....	xii
DAFTAR ISI .....	xiii
DAFTAR GAMBAR .....	xvii
DAFTAR TABEL .....	xxv
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 LATAR BELAKANG .....	1
1.2 PERUMUSAN MASALAH .....	3
1.3 TUJUAN PENELITIAN .....	3
1.4 MANFAAT .....	4
1.5 BATASAN MASALAH .....	4
1.6 SISTEMATIKA PENULISAN .....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	
2.1 TINJAUAN PUSTAKA .....	8
2.2 DASAR TEORI .....	9
2.2.1 Gerak Bangunan Apung .....	9
2.2.2 Beban Hidrodinamika .....	10
2.2.3 Gaya Eksitasi .....	10
2.2.4 Gaya Reaksi .....	12
2.2.5 Persamaan Gerak .....	15
2.2.6 RAO .....	18
2.2.7 Sistem Tambat .....	20
2.2.8 Teori Pemodelan .....	22

### BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1	DIAGRAM ALIR .....	27
3.2	PENJELASAN DIAGRAM ALIR .....	30
3.2.1	Studi Literatur dan Pengumpulan Data.....	30
3.2.2	Permodelan Eksperimen dan Numerik .....	31
3.2.3	Validasi Model.....	32
3.2.4	Rancang Model .....	32
3.2.5	Kalibrasi Model .....	33
3.2.6	Rancang Sistem Tambat .....	33
3.2.7	Parameter Sistem Tambat .....	35
3.2.8	Instrumen Laboratorium .....	36
3.2.9	Metode Analitis .....	39
3.2.10	Metode Numerik .....	39
3.2.11	Metode Eksperimen .....	41
3.3	TIMELINE.....	45

### BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1	PEMODELAN STRUKTUR .....	47
4.1.1	Pemodelan Numerik .....	47
4.1.2	Pemodelan Eksperimen .....	49
4.2	PEMODELAN TALI TAMBAT .....	56
4.3	VALIDASI MODEL.....	59
4.3.1	Validasi Model Numerik .....	59
4.3.2	Validasi Model Eksperimen .....	60
4.4	INSTRUMEN PENGUKURAN .....	65
4.4.1	Kalibrasi Gyroscope .....	65
4.4.2	Kalibrasi Image Processing .....	70
4.4.3	Kalibrasi Load Cell.....	75
4.5	RAO TERAPUNG BEBAS .....	83
4.5.1	Metode Analitis .....	83

4.5.2	Metode Numeris .....	90
4.5.3	Metode Eksperimen.....	92
4.5.4	Perbandingan RAO Metode Analitis, Numeris dan Eksperimen ..	100
4.6	RAO TERTAMBAT .....	102
4.6.1	Kekakuan Tali Tambat .....	102
4.6.2	Metode Analitis .....	108
4.6.3	Metode Numeris .....	110
4.6.4	Metode Eksperimen.....	113
4.6.5	Perbandingan RAO Tertambat Metode Analitis, Numeris dan Eksperimen.....	120
4.7	TEGANGAN TALI.....	123
4.7.1	Metode Numeris .....	124
4.7.2	Metode Eksperimen.....	126
4.7.3	Perbandingan RAO Tegangan Tertambat Metode Analitis, Numeris dan Eksperimen.....	133
4.8	STUDI PARAMETRIK (VARIASI POSISI <i>FAIRLEAD</i> ).....	137
4.8.1	Respon Gerak.....	137
4.8.2	Tegangan Tali Tambat.....	140
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		
5.1	KESIMPULAN .....	143
5.2	SARAN.....	145
DAFTAR PUSTAKA .....		147
LAMPIRAN		





## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Rencana model eksperimen SPAR dengan variasi posisi <i>fairlead</i> .....	3
Gambar 2.1	Desain anjungan SPAR .....	7
Gambar 2.2	Enam mode gerakan bangunan apung .....	9
Gambar 2.3	Beban hidrodinamika pada struktur .....	10
Gambar 2.4	Persamaan <i>added mass</i> untuk beberapa bentuk benda ....	13
Gambar 2.5	Bentuk umum grafik respons gerakan bangunan apung..	19
Gambar 2.6	Sistem tambat tipe <i>catenary</i> .....	21
Gambar 2.7	Sistem tambat tipe <i>taut</i> .....	21
Gambar 3.1	Rencana desain model SPAR .....	33
Gambar 3.2	Tampak atas rencana sistem tambat pada eksperimen ....	34
Gambar 3.3	Tampak samping rencana sistem tambat dan model SPAR	35
Gambar 3.4	Tampak atas rencana jangkar .....	35
Gambar 3.5	Diagram sistem accelerogyro .....	37
Gambar 3.6	Diagram sistem load cell .....	37
Gambar 3.7	Kamera dan benda yang ditracking .....	38
Gambar 3.8	Konfigurasi tali penahan gerak <i>drifting</i> .....	43
Gambar 3.9	Konfigurasi eksperimen model SPAR tertambat .....	44
Gambar 3.10	Setup model dengan variasi posisi <i>fairlead</i> .....	45
Gambar 4.1	Tampak isometri model .....	48
Gambar 4.2	Tampak isometri model dengan meshing .....	48
Gambar 4.3	Tampak atas model dengan meshing .....	48
Gambar 4.4	Tampak depan model dengan meshing .....	49

Gambar 4.5	(a). Tampak depan model, (b). Tampak deck dan (c). Fairlead model .....	51
Gambar 4.6	Pemberat dan ulir di dalam lambung .....	51
Gambar 4.7	Desain pemberat dan ulir .....	53
Gambar 4.8	Katalog <i>property wire rope</i> .....	57
Gambar 4.9	Bahan tali tambat .....	58
Gambar 4.10	Set up kondisi 1 pendulum test untuk perhitungan jari-jari girasi.....	61
Gambar 4.11	Pendulum test kondisi 1 .....	61
Gambar 4.12	Set-up kondisi 2 pendulum test untuk perhitungan jari-jari girasi.....	62
Gambar 4.13	Pendulum test kondisi 2 .....	62
Gambar 4.14	Instrumen giroskop .....	66
Gambar 4.15	Deck dan busur .....	66
Gambar 4.16	Setup giroskop pada deck SPAR .....	67
Gambar 4.17	Keluaran Arduino pada sudut 0° searah jarum jam.....	67
Gambar 4.18	Giroskop dan deck saat proses kalibrasi .....	68
Gambar 4.19	Keluaran Arduino dengan sudut yang dibentuk.....	70
Gambar 4.20	Sketsa model dalam Image Processing .....	71
Gambar 4.21	Kamera dan benda yang ditracking.....	71
Gambar 4.22	Konfigurasi deck dengan dot tracking .....	72
Gambar 4.23	Webcam Logitech c270 dengan menggunakan lensa <i>fix focus</i> .....	72

Gambar 4.24	Model SPAR dengan botol merah yang digunakan dalam analisa gerak model menggunakan <i>image processing</i> .....	73
gambar 4.25	<i>Background image</i> yang digunakan sebagai gambar acuan.....	74
Gambar 4.26	Output datalog dari data frame yang dihasilkan.....	74
Gambar 4.27	Output grafik dari data frame yang dihasilkan untuk gerakan heave dan surge.....	74
Gambar 4.28	Konfigurasi Load Cell (A), HX711 (B) dan Arduino UNO (C) .....	75
Gambar 4.29	Instrumen <i>Load Cell</i> dan arah beban.....	76
Gambar 4.30	Keempat Load Cell yang digunakan .....	76
Gambar 4.31	Beban Kalibrasi 1000 g (A), 500 g (B), 200 g (C), 100 g (D) dan 50 g (E).....	77
Gambar 4.32	Grafik kalibrasi Load Cell 1 .....	78
Gambar 4.33	Grafik kalibrasi Load Cell 2 .....	79
Gambar 4.34	Grafik kalibrasi Load Cell 3 .....	81
Gambar 4.35	Grafik kalibrasi Load Cell 4 .....	82
Gambar 4.36	Grafik RAO surge analitis .....	85
Gambar 4.37	Grafik RAO heave analitis .....	87
Gambar 4.38	Grafik RAO pitch analitis.....	89
Gambar 4.39	Grafik RAO surge numerik .....	90
Gambar 4.40	Grafik RAO heave numeris .....	91

Gambar 4.41	Grafik RAO pitch numeris.....	91
Gambar 4.42	Konfigurasi tali penahan drift.....	92
Gambar 4.43	Model SPAR kondisi <i>free floating</i> .....	93
Gambar 4.44	Lampu untuk penerangan.....	93
Gambar 4.45	Kode eksperimen .....	94
Gambar 4.46	Time History instrumen image processing untuk gerakan surge .....	95
Gambar 4.47	Time History instrumen image processing untuk gerakan heave.....	95
Gambar 4.48	Time History instrumen gyroscope untuk gerakan pitch	96
Gambar 4.49	Grafik RAO surge hasil eksperimen .....	97
Gambar 4.50	Grafik RAO heave hasil eksperimen .....	98
Gambar 4.51	Grafik RAO pitch hasil eksperimen.....	99
Gambar 4.52	Perbandingan RAO surge secara analitis, numeris dan Eksperimen .....	100
Gambar 4.53	Perbandingan RAO heave secara analitis, numeris dan Eksperimen .....	101
Gambar 4.54	Perbandingan RAO pitch secara analitis, numeris dan Eksperimen .....	102
Gambar 4.55	Konfigurasi SPAR .....	104
Gambar 4.56	Parameter geometris mooring .....	105
Gambar 4.57	Titik bayangan .....	107
Gambar 4.58	RAO <i>Surge</i> tertambat metode analitis .....	108

Gambar 4.59	RAO heave tertambat metode analitis .....	109
Gambar 4.60	RAO Pitch tertambat metode analitis .....	110
Gambar 4.61	Kondisi tertambat dalam MOSES .....	110
Gambar 4.62	RAO <i>surge</i> tertambat metode numerik.....	111
Gambar 4.63	RAO heave tertambat metode numerik .....	112
Gambar 4.64	RAO pitch tertambat metode numerik .....	112
Gambar 4.65	Konfigurasi eksperimen model SPAR tertambat .....	113
Gambar 4.66	Eksperimen SPAR Tertambat.....	113
Gambar 4.67	Time history instrumen image processing untuk gerakan heave tertambat .....	115
Gambar 4.68	Time history instrumen image processing untuk gerakan surge tertambat.....	115
Gambar 4.69	Time History instrumen giroskop untuk gerakan pitch tertambat .....	116
Gambar 4.70	Grafik RAO surge tertambat eksperimen .....	117
Gambar 4.71	Grafik RAO heave tertambat eksperimen .....	119
Gambar 4.72	Grafik RAO pitch tertambat eksperimen.....	120
Gambar 4.73	Perbandingan RAO surge tertambat metode analitis, metode numeris dan eksperimen .....	121
Gambar 4.74	Perbandingan RAO heave tertambat secara analitis, numeris dan eksperimen .....	122
Gambar 4.75	Perbandingan RAO pitch tertambat secara analitis, numeris dan eksperimen .....	123

Gambar 4.76	Posisi Line I, II, III dan IV .....	124
Gambar 4.77	Kondisi <i>Load Cell</i> dalam air .....	124
Gambar 4.78	Permodelan tali tambat dengan menggunakan MOSES EDITOR.....	125
Gambar 4.79	RAO Tension tali tambat I dan IV metode numerik.....	126
Gambar 4.80	RAO Tension tali tambat II dan III metode numerik.....	126
Gambar 4.81	Time History instrumen load cell tali tambat 1 .....	127
Gambar 4.82	Time History instrumen load cell tali tambat 3 .....	128
Gambar 4.83	Time History instrumen load cell tali tambat 4 .....	128
Gambar 4.84	Grafik RAO tension tali tambat load cell 1 hasil Eksperimen .....	129
Gambar 4.85	Grafik RAO tension tali tambat load cell 3 hasil Eksperimen .....	131
Gambar 4.86	Grafik RAO tension tali tambat load cell 4 hasil Eksperimen .....	132
Gambar 4.87	Perbandingan RAO Tension line I tertambat metode numeris dan eksperimen .....	133
Gambar 4.88	Perbandingan RAO Tension line II tertambat metode numeris dan eksperimen .....	134
Gambar 4.89	Perbandingan RAO Tension line III tertambat metode numeris dan eksperimen .....	135
Gambar 4.90	Perbandingan RAO Tension line IV tertambat metode . numeris dan eksperimen .....	136

Gambar 4.91	Perbandingan hasil RAO gerak <i>surge</i> model SPAR kondisi tertambat dengan variasi posisi <i>fairlead</i> .....	137
Gambar 4.92	Perbandingan hasil RAO gerak <i>pitch</i> model SPAR kondisi tertambat dengan variasi posisi <i>fairlead</i> .....	138
Gambar 4.93	Perbandingan hasil RAO gerak <i>heave</i> model SPAR kondisi tertambat dengan variasi posisi <i>fairlead</i> .....	139
Gambar 4.94	Perbandingan hasil RAO <i>tension</i> tali tambat <i>line</i> 1 dan 4 dengan variasi posisi <i>fairlead</i> .....	140
Gambar 4.95	Perbandingan hasil RAO <i>tension</i> tali tambat <i>line</i> 2 dan 3 dengan variasi posisi <i>fairlead</i> .....	141





## DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	<i>Existing function for floaters</i> .....	2
Tabel 2.1	<i>Model to prototype multiplier for the variables commonly used in mechanics under froude scaling</i> .....	24
Tabel 3.1	Data Small SPAR .....	30
Tabel 3.2	Data <i>towing tank</i> laboratorium hidrodinamika FTK ITS .....	31
Tabel 3.3	Periode gelombang yang digunakan dalam eksperimen .....	42
Tabel 4.1	Data dimensi struktur SPAR .....	47
Tabel 4.2	Distribusi massa SPAR .....	49
Tabel 4.3	Hasil penskalaan model SPAR sesuai dengan hukum Froude .....	50
Tabel 4.4	Hasil pengukuran berat material .....	52
Tabel 4.5	Perhitungan momen inersia massa Blok A .....	54
Tabel 4.6	Perhitungan momen inersia massa Blok B .....	54
Tabel 4.7	Posisi pusat massa dari setiap material yang dipakai .....	55
Tabel 4.8	Perbandingan distribusi massa hasil skala dengan hasil perhitungan .....	56
Tabel 4.9	Properti mooring line wire rope .....	57
Tabel 4.10	Spesifikasi talit tambat eksperimen .....	58
Tabel 4.11	Spesifikasi <i>mooring line</i> pada <i>prototype</i> .....	58
Tabel 4.12	Data properties tali tambat yang digunakan pada model fisik .....	59
Tabel 4.13	Perbandingan dan validasi model numerik dengan data .....	59
Tabel 4.14	Ukuran-ukuran yang digunakan pada <i>pendulum test</i> .....	63
Tabel 4.15	Periode dan frekuensi gerak pendulum model SPAR kondisi 1 dan 2 .....	63

Tabel 4.16 Validasi model SPAR .....	65
Tabel 4.17 Kalibrasi searah jarum jam .....	68
Tabel 4.18 Kalibrasi berlawanan jarum jam .....	69
Tabel 4.19 Persamaan <i>trendline</i> arduino .....	70
Tabel 4.20 Data kalibrasi load cell 1 percobaan 1 .....	77
Tabel 4.21 Data kalibrasi load cell 1 percobaan 2 .....	78
Tabel 4.22 Data kalibrasi load cell 2 percobaan 1 .....	79
Tabel 4.23 Data kalibrasi load cell 2 percobaan 2 .....	79
Tabel 4.24 Data kalibrasi load cell 3 percobaan 1 .....	80
Tabel 4.25 Data kalibrasi load cell 3 percobaan 2 .....	80
Tabel 4.26 Data kalibrasi load cell 4 percobaan 1 .....	81
Tabel 4.27 Data kalibrasi load cell 4 percobaan 2 .....	82
Tabel 4.28 Persamaan kalibrasi keluaran load cell dengan beban.....	83
Tabel 4.29 Perbandingan <i>displacement</i> dari hasil data, analitis, dan numerik .....	83
Tabel 4.30 Parameter perhitungan RAO surge .....	84
Tabel 4.31 Parameter perhitungan RAO <i>heave</i> .....	86
Tabel 4.32 Parameter perhitungan RAO <i>pitch</i> .....	89
Tabel 4.33 Periode lingkungan dan periode eksperimen .....	94
Tabel 4.34 Respon gerak dan RAO gerakan <i>surge</i> hasil eksperimen.....	96
Tabel 4.35 Respon gerak dan RAO gerakan <i>heave</i> hasil eksperimen .....	97
Tabel 4.36 Respon gerak dan RAO gerakan <i>pitch</i> hasil eksperimen.....	99
Tabel 4.37 Perbandingan RAO <i>surge</i> terapung bebas .....	100
Tabel 4.38 Perbandingan RAO <i>heave</i> terapung bebas .....	101

Tabel 4.39 Perbandingan RAO <i>pitch</i> terapung bebas .....	102
Tabel 4.40 Perhitungan <i>pretension</i> dan panjang akibat <i>pretension</i> .....	103
Tabel 4.41 Sudut sebar <i>line</i> .....	103
Tabel 4.42 Kekakuan <i>surge</i> .....	104
Tabel 4.43 Konfigurasi sudut tanah- <i>line</i> .....	105
Tabel 4.44 Kekakuan karakteristik.....	106
Tabel 4.45 Kekakuan mode gerak <i>heave</i> .....	106
Tabel 4.46 Kekakuan mode gerak <i>pitch</i> .....	108
Tabel 4.47 Periode lingkungan dan periode eksperimen model tertambat yang digunakan .....	114
Tabel 4.48 Respon gerak dan RAO gerakan <i>surge</i> hasil eksperimen model tertambat.....	117
Tabel 4.49 Respon gerak dan RAO gerakan <i>heave</i> hasil eksperimen model tertambat.....	118
Tabel 4.50 Respon gerak dan RAO gerakan <i>pitch</i> hasil eksperimen .....	120
Tabel 4.51. Perbandingan RAO <i>surge</i> tertambat .....	121
Tabel 4.52. Perbandingan RAO <i>heave</i> tertambat.....	122
Tabel 4.53 Perbandingan RAO <i>pitch</i> tertambat .....	123
Tabel 4.54 <i>Tension Force</i> maksimum tiap tali tambat pada MOSES .....	125
Tabel 4.55 Data load cell 1 hasil eksperimen.....	129
Tabel 4.56 Data load cell 3 hasil eksperimen.....	130
Tabel 4.57 Data load cell 4 hasil eksperimen.....	132
Tabel 4.58 Perbandingan <i>tension line</i> I.....	133
Tabel 4.59 Perbandingan <i>tension line</i> II.....	134

Tabel 4.60 Perbandingan <i>tension line</i> III.....	135
Tabel 4.61 Perbandingan <i>tension line</i> IV.....	136
Tabel 4.62 Perbandingan RAO <i>surge</i> terbesar di setiap variasi posisi <i>fairlead</i> .....	137
Tabel 4.63 Perbandingan RAO <i>pitch</i> terbesar di setiap variasi posisi <i>fairlead</i> .....	138
Tabel 4.64 Perbandingan RAO <i>heave</i> terbesar di setiap variasi posisi <i>fairlead</i> .....	139
Tabel 4.65 Perbandingan RAO <i>tension</i> terbesar <i>line</i> 1 dan 4 di setiap variasi posisi <i>fairlead</i> .....	140
Tabel 4.66 Perbandingan RAO <i>tension</i> terbesar <i>line</i> 2 dan 3 di setiap variasi posisi <i>fairlead</i> .....	141

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. LATAR BELAKANG

Kegiatan eksplorasi dan eksploitasi minyak dan gas dunia mulai beralih dari darat hingga menuju laut lepas. Dalam menjalankan kegiatan tersebut, seorang insinyur dituntut untuk terus mengembangkan fasilitas pendukung yang handal. Hal itu dirasakan ketika industri migas mulai beralih dari eksplorasi dan eksploitasi pada wilayah *onshore* menuju wilayah *offshore*. Sehingga mutlak perlu dilakukan pengembangan terhadap bangunan laut terapung yang mampu bertahan pada kondisi lingkungan yang terdapat di laut dalam.

Bangunan terapung telah digunakan sejak tahun 1950-an untuk fasilitas pengeboran, dan berkembang populer untuk fasilitas produksi, khususnya di daerah *deep water*. Tantangan yang muncul terhadap desain dari suatu bangunan terapung diantaranya adalah sebagai berikut (Chakrabarti, 2005):

- 1) Pengendalian berat dan stabilitas dari bangunan terapung.
- 2) Respon dinamis yang mempengaruhi beban pada tambat dan peralatan.
- 3) Pertimbangan kelelahan dari elemen struktur.
- 4) Pada beberapa wilayah, tantangan lingkungan yang baru membuat perancangan menjadi rumit (arus besar di Teluk Meksiko, laut lepas dan arus kuat di Atlantik Utara, alun periode panjang di Afrika Barat).
- 5) Instalasi dari platform, tambat, dan geladak di laut dalam.
- 6) Material baru untuk *riser* dan tambat dibutuhkan di laut dalam.

Terdapat beberapa tipe bangunan terapung yang umum digunakan di laut dalam diantaranya adalah *Floating Production Storage Offloading* (FPSO), *Semi-submersible*, *Tension Leg Platform* (TLP), dan Spar. TLP dan Spar merupakan satu-satunya bangunan terapung yang digunakan untuk *dry trees*. Selain itu, keduanya merupakan salah satu platform yang memiliki gerakan *heave* dan *pitch* paling kecil yang dapat menjaga *riser* agar tetap aman dan ekonomis (Chakrabarti, 2005). Dari segi fungsi dari keempat bangunan terapung tersebut, SPAR merupakan bangunan

terapung dengan mobilitas fungsi yang paling baik, hal itu dijelaskan pada tabel berikut:

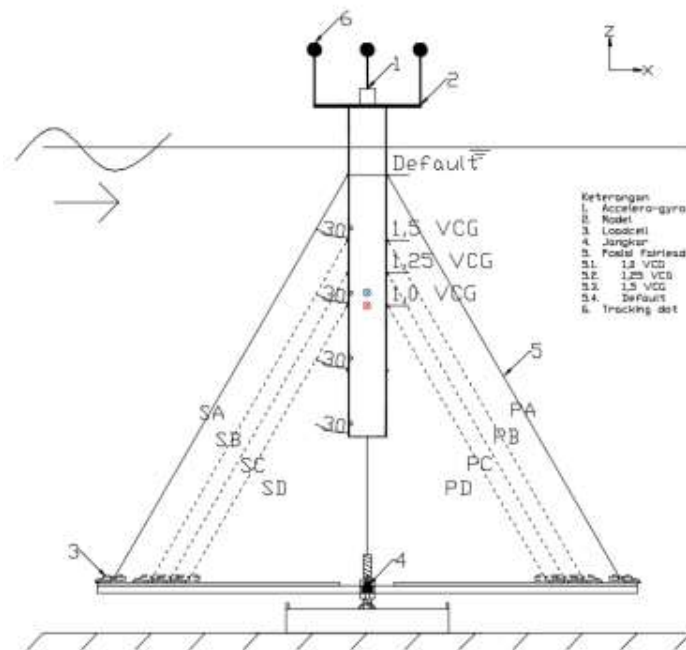
**Tabel 1.1.** *Existing Function for floaters* (Chakrabarti, 2005).

<i>Function</i>	<i>FPSO</i>	<i>Semi-submersible</i>	<i>Spar</i>	<i>TLP</i>
<i>Production</i>	<i>Yes</i>	<i>Yes</i>	<i>Yes</i>	<i>Yes</i>
<i>Storage</i>	<i>Yes</i>	<i>No</i>	<i>Yes</i>	<i>No</i>
<i>Drilling</i>	<i>No</i>	<i>Possible</i>	<i>Yes</i>	<i>Yes</i>
<i>Workover</i>	<i>No</i>	<i>Possible</i>	<i>Yes</i>	<i>Yes</i>
<i>Water Depth Limitation</i>	<i>No</i>	<i>No</i>	<i>No</i>	<i>Yes</i>

Spar digunakan pertama kalinya sebagai unit penyimpanan di Ladang Brent pada tahun 1976 dan sebagai *loading platform* untuk Ladang Draugen di lepas pantai Norway. Spar dengan desain *draught* yang besar memiliki reduksi respon gerakan *heave* secara signifikan dan memiliki kemungkinan sebagai penyimpanan minyak (Barltrop, 1996). Reduksi respon gerak *heave* dapat membebaskan penggunaan *surface trees* dan *riser* tegar, sehingga mengijinkan pengeboran dan *work-over* tanpa membutuhkan suatu *rig* pengeboran tambahan.

Hingga saat ini, spar diinstal dengan menambatkan suatu tambat yang memungkinkan gerak di enam derajat kebebasan. Dalam aplikasinya, terdapat dua jenis sistem tambat yang digunakan pada bangunan laut terapung yaitu tambat *catenary* dan tambat *taut*. Pada penelitian Jaelani (2008), gerakan spar pada sistem tambat *catenary* relatif lebih besar daripada sistem tambat *taut*. Dari tiga gerakan yang ditinjau yaitu *heave*, *surge*, dan *pitch*. Dimana dari ketiga gerakan tersebut *Response Amplitude Operator* yang didapatkan menunjukkan bahwa sistem tambat *catenary* memiliki respon yang lebih besar daripada sistem tambat *taut* (Jaelani, 2008).

Berdasarkan beberapa hal yang telah dipaparkan sebelumnya, dalam tugas akhir kali ini akan dilakukan analisis gerakan SPAR dengan variasi posisi *fairlead* sistem tambat taut akibat beban gelombang sehingga didapatkan desain SPAR yang mampu mengoptimalkan gerakan dan tegangan sistem tambat SPAR. Rancangan variasi posisi *fairlead* tersebut ditunjukkan oleh gambar 1.1.



**Gambar 1.1.** Rencana model eksperimen SPAR dengan variasi posisi *fairlead* (*default*, 1.5 VCG, 1.25 VCG, dan 1 VCG).

## 1.2. PERUMUSAN MASALAH

Permasalahan yang akan dibahas dalam tugas akhir ini diantaranya:

1. Bagaimana *Response Amplitude Operator* (RAO) gerakan *heave*, *pitch*, dan *surge* Small SPAR ketika keadaan terapung bebas ditinjau secara analitis, numerik, dan eksperimen?
2. Bagaimana *Response Amplitude Operator* (RAO) gerakan *heave*, *pitch*, dan *surge* Small SPAR ketika keadaan tertambat *taut default* dan tiga variasi posisi *fairlead* ditinjau secara analitis, numerik, dan eksperimen?
3. Bagaimana tegangan taliambat *taut* Small SPAR yang dihasilkan dari keadaan tertambat *default* dan variasi posisi *fairlead* ditinjau secara numerik, dan eksperimen?

## 1.3. TUJUAN PENELITIAN

Tujuan yang ingin dicapai dalam tugas akhir ini diantaranya:

1. Menghitung *Response Amplitude Operator* (RAO) gerakan *heave*, *pitch*, dan *surge* Small SPAR ketika keadaan terapung bebas ditinjau secara analitis, numerik, dan eksperimen.



2. Menghitung *Response Amplitude Operator* (RAO) gerakan *heave*, *pitch*, dan *surge* Small SPAR ketika keadaan tertambat *taut default* dan tiga variasi posisi *fairlead* ditinjau secara numerik, dan eksperimen.
3. Menghitung tegangan tali tambat *taut* Small SPAR yang dihasilkan dari keadaan tertambat *default* dan tiga variasi posisi *fairlead* ditinjau secara numerik, dan eksperimen.

#### **1.4. MANFAAT**

Manfaat tugas akhir ini adalah memberikan informasi hasil analisis kepada semua peneliti tentang karakteristik gerakan dan tegangan tali tambat SPAR tipe klasik akibat beban gelombang dengan variasi posisi *fairlead* yang ditinjau secara analitis, numerik, dan eksperimen.

#### **1.5. BATASAN MASALAH**

Batasan masalah yang digunakan adalah:

1. Pemodelan struktur dilakukan dengan pemodelan fisik.
2. Pemodelan fisik struktur dipersiapkan di Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS dengan menyesuaikan kedalaman maksimum *towing tank*  $\pm 1,8$  m.
3. Beban yang dipertimbangkan hanya beban gelombang.
4. Gelombang yang digunakan pada eksperimen adalah gelombang reguler.
5. Teori gelombang yang digunakan adalah Teori Gelombang Airy.
6. Arah gelombang hanya mempertimbangkan gelombang dengan sudut datang  $0^\circ$ .
7. Efek non-linier tidak dipertimbangkan dalam penelitian
8. Gerakan struktur yang ditinjau adalah *heave*, *surge*, dan *pitch*.
9. Efek hidrodinamika dari sub-struktur tidak diperhitungkan.
10. Interaksi sistem tambat dengan tanah diabaikan.
11. Eksperimen menggunakan sistem tambat taut berjumlah 4 *lines*.

## **1.6. SISTEMATIKA PENULISAN**

Sistematika penulisan laporan tugas akhir dijelaskan oleh uraian berikut:

### **BAB I PENDAHULUAN**

Bab ini meliputi penjelasan tentang latar belakang disusunnya tugas akhir, perumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, serta sistematika penulisan laporan tugas akhir.

### **BAB II DASAR TEORI**

Bab ini meliputi penjelasan tentang teori-teori yang mendukung penulis dalam menyelesaikan analisis pada tugas akhir ini.

### **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

Bab ini meliputi penjelasan tentang alur pengerjaan tugas akhir ini dalam bentuk diagram alir atau *flow chart* yang disusun secara sistematis dan deskripsi dari setiap langkah dalam pengerjaan tugas akhir ini.

### **BAB IV ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN**

Bab ini meliputi pembahasan mengenai pemodelan fisik, analitis, dan numerik serta perbandingan hasil gerak SPAR antara ketiga pemodelan tersebut.

### **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

Bab ini meliputi kesimpulan dari analisis serta saran berdasarkan hasil dari tugas akhir yang telah dicapai.

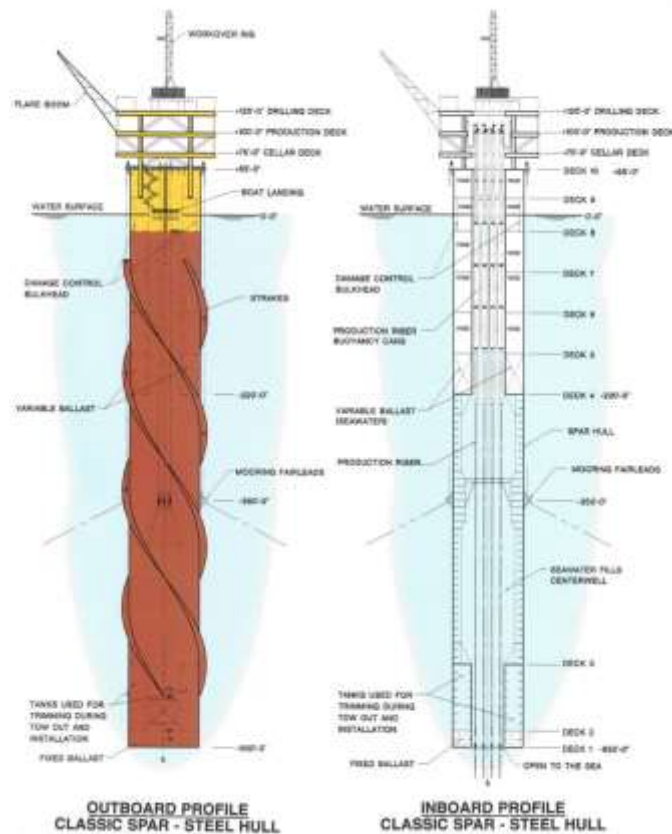
**HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN**

## BAB II

## TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

## 2.1.TINJAUAN PUSTAKA

SPAR (*Single Point Anchor Reservoir*) merupakan bangunan lepas pantai terapung yang dapat digunakan untuk proses pengeboran, produksi, maupun unit penyimpanan. Bangunan ini memiliki bentuk geometri silinder vertikal dengan sarat yang sangat besar. Hal itu membuat respon gerakan *heave* dari bangunan ini tereduksi sehingga memungkinkan untuk dijadikan fasilitas penyimpanan minyak. Selain itu SPAR diinstal dengan sistem tambat untuk membatasi gerakan pada enam derajat kebebasan (Barltrop, 1996).



**Gambar 2.1.** Desain Anjungan SPAR (Global Security, 2000).

Dalam mendesain lambung SPAR, beberapa parameter yang perlu diperhatikan diantaranya (Chakrabarti, 2005):

1. Diameter
2. Kedalaman *Hard Tank*
3. *Ballast* tetap

#### 4. Sarat

#### 5. Elevasi *Fairlead*

Pada penelitian Jaelani (2008) melakukan kajian eksperimental mengenai perbandingan pengaruh sistem tambat *taut* dan *catenary* terhadap gerakan SPAR tipe klasik akibat beban gelombang. Kajian tersebut menghasilkan respon gerakan SPAR dengan sistem tambat *catenary* lebih besar dari *taut*, yaitu sebesar 65.23% untuk *heave*, 76.77% untuk *surge*, dan 17.24% untuk *pitch*. Namun setelah dibandingkan dengan hasil numerik ternyata hasil eksperimen relatif berbeda dari hasil pemodelan numerik. Hal itu mungkin terjadi karena pengaruh kestabilan instrumentasi eksperimen dan fungsi pembangkit gelombang yang tidak bekerja sebagaimana mestinya (Jaelani, 2008).

Kemudian pada penelitian Seebai dan Sundaravadivelu (2009), dilakukan analisis efek dari sistem tambat jenis *taut* dan *catenary* pada anjungan Spar dengan 5MW *Wind Turbine*. Pada penelitiannya, mereka menggunakan RAO percepatan untuk menganalisis respon gerak dari Spar. RAO percepatan yang dihasilkan oleh sistem tambat *catenary* lebih besar dibandingkan dengan RAO percepatan yang dihasilkan oleh sistem tambat *taut* (Seebai & Sundaravadivelu, 2009).

Pada penelitian Jose dan Philip (2015), dilakukan analisis efektivitas tali tambat pada platform spar. analisa dilakukan dengan membandingkan respon gerakan SPAR menggunakan sistem tambat longgar dan kencang. Pada penelitian ini dihasilkan respon gerak dari sistem tambat longgar lebih besar 10%-40% daripada sistem tambat kencang (Jose & Philip, 2015).

Lalu pada penelitian Montasir dkk (2015), suatu *truss* SPAR dimodelkan sebagai *rigid body* dengan tiga derajat kebebasan lalu dilakukan analisis respon dinamis dari platform dengan analisis *time-domain* dengan menghitung kinematik gelombang dan gaya gelombang menggunakan teori gelombang *Airy* dan persamaan morison. Perbedaan respon gerakan yang terjadi ternyata tidak signifikan dengan penggantian konfigurasi tali tambat dengan kondisi sudut azimuth. Namun *offset* awal dari platform terpengaruh secara signifikan dengan konfigurasi tali tambat (Montasir, et al., 2015).

## 2.2.DASAR TEORI

### 2.2.1.Gerak Bangunan Apung

SPAR, merupakan salah satu bangunan apung yang dapat bergerak dalam 6 derajat kebebasan. Gerak bangunan apung tersebut dibagi menjadi 2 kelompok yaitu gerak translasi dan gerak rotasi. Gerak-gerak tersebut dijelaskan pada uraian berikut (Journée & Massie, 2001):

#### 1. Gerakan translasi

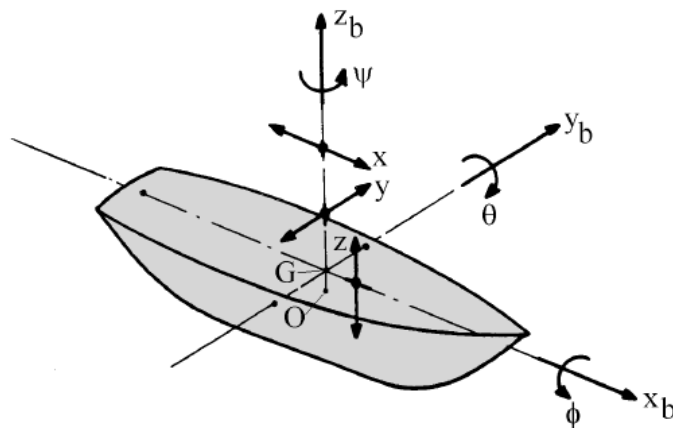
Gerakan translasi adalah gerakan yang searah dengan arah sumbu. Gerakan translasi terdiri dari :

- *Surging* : gerakan translasi pada arah sumbu x
- *Swaying* : gerakan translasi pada arah sumbu y
- *Heaving* : gerakan translasi pada arah sumbu z

#### 2. Gerakan rotasional

Gerakan rotasional adalah gerakan yang membentuk sudut terhadap sumbu, gerakan rotasional ini terdiri dari :

- *Rolling* : gerakan rotasional terhadap sumbu x
- *Pitching* : gerakan rotasional terhadap sumbu y
- *Yawing* : gerakan rotasional terhadap sumbu z

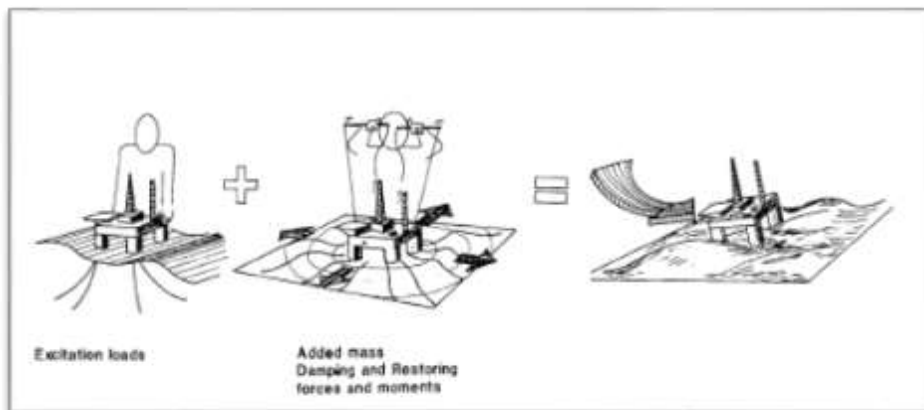


**Gambar 2.2.** Enam Mode Gerakan Bangunan Apung (Journée & Massie, 2001).

### 2.2.2. Beban Hidrodinamika

Suatu struktur terapung akan menerima beban hidrodinamika. Beban hidrodinamika yang diterima oleh struktur terapung dapat dipahami sebagai 2 sub-masalah diantaranya (Faltinsen, 1990):

1. Gaya dan momen yang dirasakan struktur terapung, saat benda ditahan untuk berosilasi yang berada serta menerima gelombang datang. Beban ini disebut sebagai beban akibat eksitasi gelombang. Beban ini secara umum terdiri dari gaya tekanan (yang biasa disebut Froude Krylov Force) dan gaya difraksi.
2. Gaya dan momen yang dirasakan struktur terapung, saat struktur digetarkan dengan frekuensi yang sama dengan gaya eksitasi gelombang yang datang. Namun, pada kali ini, tidak ada gelombang yang mengenai struktur. Beban hidrodinamika yang didapat dari sub masalah ini adalah beban massa tambah (*added mass*), beban redaman (*damping*) dan beban kekakuan (*restoring force*). Beban ini bisa juga dianggap sebagai beban reaksi akibat pergerakan struktur.



**Gambar 2.3.** Beban hidrodinamika pada struktur (Faltinsen, 1990)

Sub masalah 1 dan 2 tersebut dapat dihubungkan secara linear sehingga gaya hidrodinamik total pada struktur terapung merupakan penjumlahan sub-masalah 1 dan sub-masalah 2.

### 2.2.3. Gaya Eksitasi

Gaya eksitasi yang diterima dari struktur terjadi akibat adanya distribusi tekanan yang tidak merata dari gelombang. Dampak dari tekanan yang tidak

merata ini disebut sebagai gaya Froude-Krylof. Selain itu, pada struktur dengan ukuran yang cukup besar, keberadaan struktur juga akan menyebabkan perubahan distribusi tekanan. Efek dari perubahan distribusi tekanan akibat adanya struktur yang besar ini disebut dengan gaya difraksi. Gaya Froude-Krylof dapat dicari menggunakan persamaan (2.1).

$$F_{FK_i} = \int p n_i dA \quad (2.1)$$

dengan,

$p$  = Tekanan Gelombang, untuk perairan dalam sesuai dengan persamaan (3.2)

$n_i$  = Vektor satuan arah luasan kecil

$dA$  = Luasan kecil struktur

Persamaan (2.1) menghubungkan antara distribusi tekanan yang diakibatkan medan gelombang dengan luas permukaan dari struktur. Distribusi tekanan gelombang di laut dalam untuk struktur didapat dengan menggabungkan persamaan potensial gelombang dengan persamaan berneouli sehingga didapat persamaan (2.2). Sedangkan gaya difraksi pada struktur terapung perlu dilakukan peninjauan syarat batas dari setiap kasus dan memerlukan pendekatan matematis yang kompleks.

$$p = \rho g \zeta_0 e^{kz} \sin(\omega t - kx) \quad (2.2)$$

dengan,

$\rho$  = Massa jenis air sekitar struktur

$g$  = Percepatan gravitasi

$\zeta_0$  = Amplitudo gelombang

$k$  = Angka gelombang

$z$  = Posisi di sumbu vertikal, dengan nilai 0 di permukaan air

$\omega$  = Percepatan sudut gelombang

$t$  = Waktu

$x$  = Posisi di sumbu horizontal, searah dengan arah gelombang



#### 2.2.4. Gaya Reaksi

Gaya reaksi pada struktur dipengaruhi added mass, redaman dan kekakuan. Berikut penjelasan masing-masing komponen tersebut.

##### a. Massa / Displacement SPAR

Massa dari sebuah struktur yang beroperasi di laut dapat dihitung dengan menerapkan konsep hukum Archimedes. Pada penelitian ini, struktur yang dianalisa berupa SPAR dimana massa dari SPAR ini dapat dihitung dengan meninjau bagian struktur SPAR yang terendam di air atau disebut juga *volume displacement* dikalikan dengan massa jenis perairan tersebut. Secara matematis, perhitungan massa/displacement dari struktur SPAR dapat menggunakan persamaan 2.6 berikut ini.

$$(\Delta) = \frac{1}{4} \times \pi \times D^2 \times \rho \quad (2.3)$$

dengan,

$\Delta$  = massa dari struktur yang tercelup (*displacement*)

D = diameter struktur

$\rho$  = Massa jenis air

##### b. Added Mass

Bessel (1828) melakukan eksperimen osilasi dalam bentuk pendulum di air dan di udara. Ia menemukan bahwa walaupun dengan massa pendulum yang sama, pendulum yang di dalam air mempunyai massa yang lebih besar daripada pendulum yang di udara. Bessel kemudian menginterpretasikan hal ini sebagai masa tambah (*added mass*) (Sarpkaya, 2010).



Sebenarnya tidak ada massa yang ditambahkan ke dalam sistem, efek penambahan massa ini diakibatkan oleh ikut Bergeraknya fluida di sekitar benda terapung (Newman, 1977). Ikut Bergeraknya fluida tersebut menambah energi kinetik, sehingga diperlukan gaya eksternal. Gaya tersebut jika dibagi dengan percepatan benda maka akan menghasilkan komponen massa. Massa inilah yang dianggap sebagai massa tambah (Sarpkaya, 2010). Massa tambah bergantung terhadap bentuk benda serta mode gerak.

Persamaan (2.4) merupakan formula dari gaya masa tambah, dimana merupakan perkalian antara massa tambah dengan percepatan gerak benda terapung. Sarpkaya (2010) menemukan beberapa nilai masa tambah ( $a$ ) untuk beberapa bentuk sederhana. Untuk gerak silinder, dengan beberapa orientasi dapat dilihat pada gambar 2.5.

$$F_{ma} = m_{ai}\ddot{\xi}_i \quad (2.4)$$

dengan,

- $i$  = Mode gerak struktur dengan  
1 (surge), 2 (sway), 3 (heave), 4 (roll), 5 (pitch) dan 6 (yaw)
- $m_a$  = massa tambah
- $\ddot{\xi}$  = Respon percepatan gerak struktur

SHAPE	ADDED MASS PER UNIT LENGTH	
	← MOTION →	
	CIRCLE	$\rho\pi c^2$
	CIRCULAR DISK	$\frac{8}{3}\rho c^3$

**Gambar 2.4.** Persamaan *added mass* untuk beberapa bentuk benda  
(Sarpkaya, 2010).

#### c.Redaman

Redaman merupakan dampak yang didapat akibat adanya disipasi energi dari struktur (Newman, 1977). Redaman akan membuat struktur kehilangan energi kinetiknya. Jika struktur digetarkan di air yang tenang, maka energi kinetik struktur (gerakan) semakin lama akan semakin mengecil, hal inilah yang disebut sebagai redaman. Sama seperti massa tambah, nilai redaman bergantung dari bentuk benda dan mode gerak benda. Sebagai gaya reaksi, gaya ini mempunyai persamaan (2.5). Persamaan ini merupakan perkalian

antara redaman benda dengan kecepatan gerak benda. Nilai redaman dapat dicari dengan menggunakan analisa numeris (Chakrabarti, 2005).

$$F_b = b_i \dot{\xi}_i \quad (2.5)$$

dengan,

- $i$  = Mode gerak struktur dengan  
1 (surge), 2 (sway), 3 (heave), 4 (roll), 5 (pitch) dan 6 (yaw)
- $b$  = Nilai redaman sistem
- $\dot{\xi}$  = Respon kecepatan gerak struktur

#### d. Kekakuan

Ketika struktur terapung bergerak di permukaan air tenang, tanpa gelombang, struktur tersebut mempunyai kekakuan untuk kembali ke posisi awalnya. Fenomena ini hanya terjadi pada 3 mode gerak struktur. Mode gerak tersebut adalah gerak heave ( $\xi_{33}$ ), pitch ( $\xi_{44}$ ) dan roll ( $\xi_{55}$ ) (Djarmiko, 2012). Gaya ini dipengaruhi oleh karakter hidrostatis struktur. Gaya reaksi yang berfungsi untuk mengembalikan posisi benda disebut gaya pengembali (*restoring force*) yang mempunyai persamaan (2.6). Persamaan ini merupakan perkalian antara kekakuan dengan displacement gerak.

$$F_c = c_i \xi_i \quad (2.6)$$

dengan,

- $i$  = Mode gerak struktur dengan  
1 (surge), 2 (sway), 3 (heave), 4 (roll), 5 (pitch) dan 6 (yaw)
- $c$  = Kekakuan struktur
- $\xi$  = Respon posisi gerak struktur

Nilai  $c$  dari heave, pitch dan roll adalah sebagai berikut :

$$c_3 = \rho g A_{wp} \quad (2.7)$$

$$c_4 = \rho g V \overline{GM}_T \quad (2.8)$$

$$c_5 = \rho g V \overline{GM}_L \quad (2.9)$$

dengan,

$\rho$  = Massa jenis air sekitar struktur

$g$  = Percepatan gravitasi struktur

$A_{wp}$  = Luas permukaan di garis air

$V$  = Volume displacement struktur

$\overline{GM}_T$  = Panjang metacentre melintang

$\overline{GM}_L$  = Panjang metacentre memanjang

### 2.2.5. Persamaan Gerak

Gerak dari bangunan apung dapat dianalisa menggunakan hukum II Newton yaitu:

$$\sum F = m_i \ddot{\xi}_i \quad (2.10)$$

dengan,

$i$  = Mode gerak struktur dengan

1 (surge), 2 (sway), 3 (heave), 4 (roll), 5 (pitch) dan 6 (yaw)

$\sum F$  = Resultan gaya

$m$  = Massa struktur

$\ddot{\xi}$  = Percepatan struktur

Persamaan (2.10) menunjukkan hubungan antara resultan gaya dengan massa benda dan percepatan benda. Resultan gaya untuk benda terapung merupakan pengurangan gaya aksi dengan gaya reaksi. Hal ini dikarenakan gaya aksi (gaya eksitasi) memberi gaya kepada struktur sedangkan gaya reaksi merupakan gaya yang dilakukan oleh struktur (persamaan 2.11)

$$\sum F = F_{eksitasi} - F_{reaksi} \quad (2.11)$$

$$\sum F = F_{eksitasi} - (F_a + F_b + F_c) \quad (2.12)$$

Dengan memasukkan pengertian gaya eksitasi dan gaya reaksi pada struktur terapung yang terkena gelombang, maka persamaan 2.10 dapat dikembangkan menjadi persamaan 2.11. Dengan,

$\sum F$	= Resultan gaya
$F_{eksitasi}$	= Gaya eksitasi gelombang
$F_a$	= Gaya inersia
$F_b$	= Gaya redaman
$F_c$	= Gaya pengembali

Dengan memasukkan persamaan (2.4, 2.5 dan 2.6) ke persamaan (2.10; 2.11) maka didapat :

$$m_i \ddot{\xi}_i = F_{eksitasi} - (a_i \ddot{\xi}_i + b_i \dot{\xi}_i + c_i \xi_i) \quad (2.13)$$

$$(m_i + a_i) \ddot{\xi}_i + b_i \dot{\xi}_i + c_i \xi_i = F_{eksitasi} \quad (2.14)$$

dengan,

$i$	= Mode gerak struktur dengan 1 (surge), 2 (sway), 3 (heave), 4 (roll), 5 (pitch) dan 6 (yaw)
$F_{eksitasi}$	= Gaya eksitasi gelombang
$m$	= Massa struktur
$a$	= Koefisien massa tambah
$\ddot{\xi}$	= Respon percepatan gerak struktur
$b$	= Nilai redaman sistem
$\dot{\xi}$	= Respon kecepatan gerak struktur
$c$	= Kekakuan struktur
$\xi$	= Respon posisis gerak struktur

Persamaan (2.14) merupakan persamaan yang tidak memperhatikan gerak kopel bangunan. Dalam pengertian itu, setiap mode gerak tidak mempengaruhi gerak benda yang lain. Di sisi lain, gerak couple adalah persamaan gerak yang setiap geraknya bisa saling mempengaruhi gerak yang lainnya. Menurut Djatmiko (1992), persamaan gerak couple untuk kondisi terapung dapat direpresentasikan dalam bentuk matriks, dengan persamaan 2.15.

$$\sum_{n=1}^6 [(M_{jk} + A_{jk})\xi_k + B_{jk}\dot{\xi}_k + C_{jk}\xi_k] = F_j e^{i\omega t}, j = 1 \quad (2.15)$$

dengan:

$M_{jk}$  = komponen matriks massa kapal

$A_{jk}, B_{jk}$  = matriks koefisien massa tambah dan redaman

$C_{jk}$  = koefisien-koefisien gaya hidrostatik pengembali

$F_j$  = amplitudo gaya eksitasi dalam besaran kompleks

F1, F2, dan F3 adalah amplitudo gaya-gaya eksitasi yang mengakibatkan *surge*, *sway*, dan *heave*. Sedangkan F4, F5, dan F6 adalah amplitudo momen eksitasi untuk *roll*, *pitch*, dan *yaw*.

Pada kasus bangunan apung yang tertambat persamaan gerak menjadi persamaan 2.16 (Chen, 2011)

$$\sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^6 [-\omega^2 (\delta_{nm} \mathbf{M}_{jk}^{nm} + \mathbf{A}_{jk}^{nm}) - i\omega \mathbf{B}_{jk}^{nm} + \delta_{nm} \mathbf{C}_{jk}^{nm} + \mathbf{C}_{jk}^{*nm}] \xi_j = \mathbf{F}_j^n \quad (2.16)$$

dengan,

$n$  = 1, 2, 3...M menunjukkan jumlah nth struktur,

$\delta_{nm}$  = symbol Kronecker delta, mempunyai nilai 0 jika  $n \neq m$  dan 1 jika  $n = m$ , sehingga  $\mathbf{M}_{jk}^{mm}$  and  $\mathbf{C}_{jk}^{mm}$  adalah matriks inersia dan hidrostatik dari bangunan  $m^{th}$

$\mathbf{A}_{jk}^{nm}$  = matrik massa tambah untuk bangunan  $m^{th}$  akibat gerak bangunan sendiri ( $n = m$ ), dan matriks massa tambah bangunan  $m^{th}$  akibat bangunan  $n^{th}$  ( $n \neq m$ ),

$\mathbf{B}_{jk}^{nm}$  = matrik redaman hidrodinamika untuk bangunan mth akibat gerak bangunan sendiri ( $n = m$ ), dan matriks redaman hidrodinamika mth akibat bangunan nth saat ( $n \neq m$ ),

$\mathbf{C}_{jk}^{*nm}$  = matrik kekakuan untuk bangunan mth akibat gerak bangunan sendiri ( $n = m$ ), dan matriks kekakuan mth akibat bangunan nth saat ( $n \neq m$ ),

$\mathbf{F}_j^n$  = matriks gaya eksitasi pada bangunan nth.

Berdasarkan Van Malree dan Van Boom (1991), komponen eksitasi terdiri dari gaya gelombang orde 1 ( $\mathbf{F}_{j-wv}^{n(1)}$ ), gaya gelombang orde 2 ( $\mathbf{F}_{j-wv}^{n(2)}$ ), arus ( $\mathbf{F}_{j-c}^n$ ), angin ( $\mathbf{F}_{j-w}^n$ ), mesin pendorong ( $\mathbf{F}_{j-th}^n$ ) dan sistem control lainnya ( $\mathbf{F}_{j-ct}^n$ ) seperti sirip penstabil (*stabilizing fins*). Sehingga matriks gaya eksitasi menjadi

$$\mathbf{F}_j^n = \mathbf{F}_{j-wv}^{n(1)} + \mathbf{F}_{j-wv}^{n(2)} + \mathbf{F}_{j-c}^n + \mathbf{F}_{j-w}^n + \mathbf{F}_{j-th}^n + \mathbf{F}_{j-ct}^n \quad (2.17)$$

## 2.2.6. Response Amplitude Operator (RAO)

*Response Amplitude Operator* (RAO) atau disebut juga dengan *Transfer Function* merupakan fungsi respon yang terjadi akibat gelombang dalam rentang frekuensi yang mengenai struktur. RAO merupakan alat untuk mentransfer gaya gelombang menjadi respon gerakan dinamis struktur.

RAO memuat informasi tentang karakteristik gerakan bangunan laut yang disajikan dalam bentuk grafik, dimana absisnya adalah parameter frekuensi, sedangkan ordinatnya adalah rasio antara amplitudo gerakan pada mode tertentu,  $\zeta_{k0}$ , dengan amplitudo gelombang,  $\zeta_0$ . Secara matematis RAO dapat dituliskan sesuai dengan persamaan 2.18:

$$RAO(\omega) = \frac{\zeta_{k0}(\omega)}{\zeta_0(\omega)} \quad (\text{m/m}) \quad (2.18)$$

dengan:

$\zeta_{k0}(\omega)$  = amplitudo struktur (m)

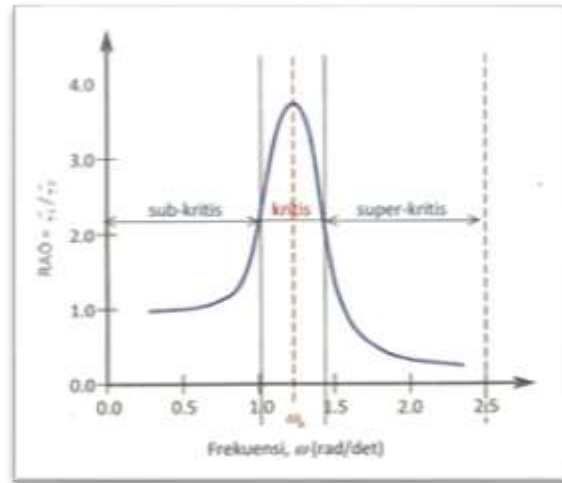
$\zeta_0(\omega)$  = amplitudo gelombang (m)

Respon gerakan RAO untuk gerakan translasi (*surge, sway, heave*) merupakan perbandingan langsung antara amplitudo gerakan dibanding dengan amplitudo gelombang insiden (keduanya dalam satuan panjang) (Djarmiko, 2012). Persamaan RAO untuk gerakan translasi sama dengan persamaan 2.18 di atas.

Sedangkan untuk respon gerakan RAO untuk gerakan rotasi (*roll, pitch, yaw*) merupakan perbandingan antara amplitudo gerakan rotasi (dalam

radian) dengan kemiringan gelombang, yakni yang merupakan perkalian antara gelombang ( $k_w = \omega^2/g$ ) dengan amplitudo gelombang insiden (Djarmiko, 2012):

$$RAO(\omega) = \frac{\zeta_{k0}(\omega)}{k_w \zeta_0(\omega)} = \frac{\zeta_{k0}}{(\omega^2 / g) \zeta_0} \text{ (rad/rad)} \quad (2.19)$$



**Gambar 2.5.** Bentuk umum grafik respons gerakan bangunan apung (Djarmiko, 2012)

Berdasarkan Gambar 2.9, kurva respons gerakan bangunan apung pada dasarnya dapat dibagi menjadi tiga bagian:

- Pertama adalah bagian frekuensi rendah, atau gelombang (dengan periode) panjang, yang disebut daerah sub-kritis. Pada daerah ini bangunan laut akan bergerak mengikuti pola atau kontur elevasi gelombang yang panjang sehingga amplitudo gerakan kurang lebih akan ekuivalen dengan amplitudo gelombang, atau disebut sebagai *contouring*. Dalam korelasi persamaan hidrodinamis, di daerah frekuensi rendah, atau  $\omega^2 < k/(m+a)$ , gerakan akan didominasi oleh faktor kekakuan (Djarmiko, 2012).
- Kedua adalah daerah kritis, meliputi pertengahan lengan kurva di sisi frekuensi rendah sampai dengan puncak kurva dan diteruskan ke pertengahan lengan kurva di sisi frekuensi tinggi. Puncak kurva berada pada frekuensi alami, yang merupakan daerah resonansi, sehingga respons gerakan mengalami magnifikasi, atau amplitudo gerakan akan



beberapa kali lebih besar daripada amplitudo gelombang. Secara hidrodinamis di daerah frekuensi alami, yakni  $k/(m+a) < \omega^2 < k/a$ , gerakan akan didominasi oleh faktor redaman (Djarmiko, 2012).

- Ketiga adalah daerah super kritis, yaitu daerah frekuensi tinggi, atau gelombang-gelombang (dengan periode) pendek. Pada daerah ini respons gerakan akan mengecil. Semakin tinggi frekuensi, atau semakin rapat antara puncak-puncak gelombang yang berurutan, maka akan memberikan efek seperti bangunan laut bergerak di atas air yang relatif datar. Oleh karena itu gerakan bangunan laut diistilahkan sebagai *platforming*. Dalam hal korelasi hidrodinamis, gerakan di daerah frekuensi tinggi ini, dimana  $\omega^2 < k/a$ , gerakan akan didominasi oleh faktor massa (Djarmiko, 2012).

#### 2.2.7. Sistem Tambat (*Mooring System*)

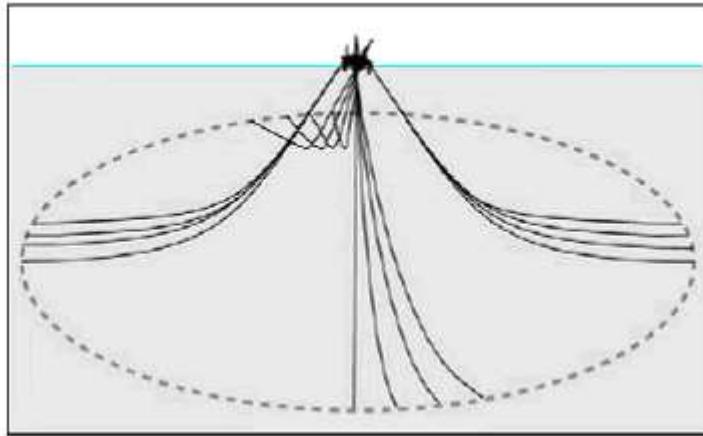
Sistem tambat (*mooring system*) pada struktur terapung lepas pantai seperti SPAR, TLP, Kapal dan lain-lain berfungsi untuk menjaga posisi struktur supaya tetap berada pada posisinya terhadap gaya-gaya yang bekerja seperti angin, arus dan gelombang ketika beroperasi. Secara garis besar, konfigurasi sistem tambat pada SPAR berupa jenis tambat menyebar (*spread mooring*) yang terdiri dari *catenary mooring* atau *taut mooring*. Sistem tambat pada umumnya terangkai dari sejumlah *lines* yang terbuat dari *chain*, kabel (*wire*), atau tali sintetik (*synthetic rope*). Bagian atas dari *mooring line* ini dipasang pada badan struktur terapung di titik-titik yang berbeda sedangkan bagian bawah *mooring line* nya ditambatkan ke dasar laut. Kabel-kabel *mooring* terangkai dari rantai baja (*steel chain*), tali ataupun kombinasi dari keduanya. Gaya tension yang terjadi pada kabel tergantung dari berat kabel, *property* elastisitasnya sendiri dan sistem tambatnya.

Tipe-tipe dari sistem tambat pada struktur bangunan apung lepas pantai utamanya SPAR adalah sebagai berikut :

- *Catenary Line Mooring*

Merupakan sistem tambat pertama yang paling umum. Ketika berada di dasar laut posisi *mooring* horizontal sehingga pada *catenary mooring* ini

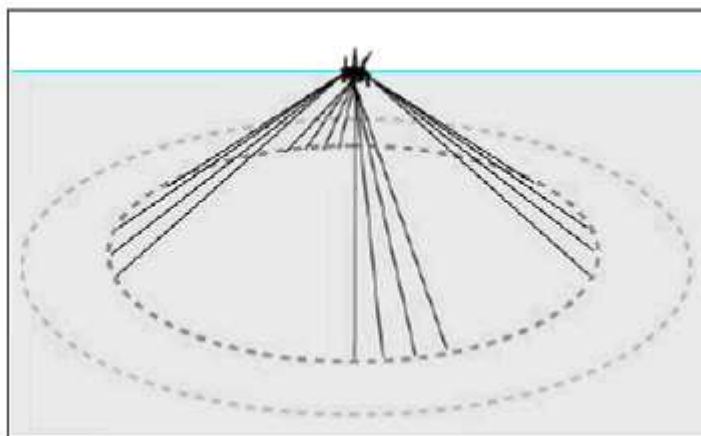
jangkar hanya dikenakan beban horizontal. Pada *catenary mooring*, gaya pengembali dihasilkan oleh berat *mooring lines* sendiri.



**Gambar 2.6.** Sistem tambat tipe *catenary* (Hammoutene, 2006)

- *Taut Mooring System*

Sistem tambat ini memiliki konfigurasi mooring lines dengan tali yang tegang. Perbedaan utamanya dengan *catenary mooring* adalah posisi *anchorleg*. *Taut mooring* ketika berada di dasar laut posisi *mooring* nya bersudut sehingga jangkar harus mampu menahan beban yang terjadi baik beban horizontal maupun vertikal. Pada *taut mooring*, gaya pengembali dihasilkan oleh berat *mooring lines* sendiri. Keuntungan dari *taut mooring* jika dibandingkan dengan *catenary mooring* adalah radius tambatannya lebih kecil.



**Gambar 2.7.** sistem tambat tipe *taut* (Hammoutene, 2006).

Persamaan dalam menganalisa sistem tambat dapat dilakukan dengan persamaan 2.20. Persamaan ini merupakan keseimbangan antara persamaan

gerak yang mengakomodir gaya eksitasi akibat arus, angin dan gelombang kepada struktur. Sesuai dengan Wichers & Huijsmans (1984), Wichers (1986; 1987; 1988a; 1988b) dan API (2001), persamaan analisa sistem tambat sebagai berikut

$$\mathbf{M}(\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{x}}) = \mathbf{X}_H + \mathbf{X}_W + \mathbf{X}_M + \mathbf{X}^{(2)} \quad (2.20)$$

dengan

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_6)^T$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\dot{x}_2 \\ 0 & 0 & \dot{x}_6 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$\mathbf{X}_H$  = vektor gaya hidrodinamika dan gaya arus,

$\mathbf{X}_W$  = vektor gaya angin,

$\mathbf{X}_M$  = vektor gaya tali tambat

$\mathbf{X}^{(2)}$  = vektor gaya orde-2 gelombang

### 2.2.8. Teori Pemodelan

Dalam melakukan pemodelan suatu prototipe dengan skala kecil, terdapat tiga hal penting yang harus diperhatikan sehingga model dapat merepresentasikan perilaku geometri struktur, aliran fluida dan interaksi antara keduanya. Oleh karena itu, harus dicari kesamaan dalam geometri, kinematika fluida, dan dinamika dari struktur yang dikenai oleh fluida di sekitarnya (Munson, et al., 2009).

- Kesamaan geometri

Dalam hal kesamaan geometri, model yang akan dibuat harus memiliki kesamaan dalam bentuk, tetapi berbeda dimensi. Model yang dibuat harus disesuaikan dengan suatu faktor skala sehingga sebanding dengan prototipe yang dijadikan acuan, terutama pada bagian yang terendam. Rasio skala tersebut dapat dengan mudah diasumsikan dengan rasio skala konstan diantara dimensi model dan prototipe.

$$\frac{l_p}{l_m} = a \quad (2.21)$$

Dimana  $l_p$  dan  $l_m$  dua dimensi yang bersesuaian dari dua struktur yang dinamakan prototipe dan model, dan  $a$  merupakan rasio skala diantara keduanya. Jika seluruh bentuk dan dimensi (diameter, panjang, dll) dari suatu model sudah sebanding dengan prototipe, maka dapat dikatakan keduanya sama secara geometri. Rasio ini selanjutnya akan digunakan sebagai faktor skala untuk model yang didefinisikan sebagai  $\lambda$ .

- **Kesamaan Kinematik**

Dalam hal kesamaan kinematika, rasio dari kecepatan dan percepatan yang digunakan dalam model harus dijaga. Rasio dari kecepatan pada prototipe dengan kecepatan model yang bersesuaian harus konstan. Hal ini berlaku pada seluruh kecepatan termasuk kecepatan partikel fluida, angin, towing, model pada arah tertentu. Sama seperti sebelumnya, rasio dari percepatan model harus sama dengan prototipe, tetapi dengan rasio yang berbeda dengan kecepatan. Ketika percepatan dan kecepatan model sudah sama dengan prototipe, maka keduanya dapat dikatakan memiliki kesamaan kinematik.

- **Kesamaan Hidrodinamik**

Hukum skala dalam kesamaan hidrodinamik ditentukan oleh rasio dari gaya. Ada beberapa hukum skala dalam kesamaan hidrodinamik berdasarkan masalah interaksi struktur dengan fluida. Kesamaan dinamik antara model dan prototipe didapatkan dengan memenuhi hukum kesamaan tersebut. Dalam kebanyakan kasus, hanya satu dari beberapa hukum skala tersebut yang dapat memenuhi model struktur. Oleh karena itu, hal penting yang perlu dipahami adalah proses fisik yang dialami oleh struktur. Kemudian memilih hukum skala yang paling penting yang mengatur proses tersebut (Chakrabarti, 1994).

### **Hukum Model Froude**

Bilangan froude didefinisikan sebagai perbandingan antara gaya inersia terhadap gaya gravitasi yang dihasilkan oleh benda pada suatu medium (Chakrabarti, 1994). Bilangan froude didefinisikan dengan persamaan,

$$Fr = \frac{u^2}{(gD)} \quad (2.22)$$

Model froude harus memenuhi hubungan,

$$\frac{u_p^2}{(gD_p)} = \frac{u_m^2}{(gD_m)} \quad (2.23)$$

Dengan mengasumsikan faktor skala kesamaan geometri adalah  $\lambda$ , hubungan antara model dengan prototipe untuk bermacam parameter dapat diperoleh. Tabel berikut merupakan faktor skala dari variabel-variabel yang umum digunakan dan memenuhi persyaratan model Froude.

**Tabel 2.1.a.** *Model to Prototype Multiplier for The Variables Commonly Used in Mechanics Under Froude Scaling* (Chakrabarti, 1994).

<b>VARIABLE</b>	<b>UNIT</b>	<b>SCALE FACTOR</b>	<b>REMARKS</b>
<b><u>GEOMETRY</u></b>			
<i>Length</i>	<i>L</i>	$\lambda$	<i>Any Characteristic dimension of the object</i>
<i>Area</i>	$L^2$	$\lambda^2$	<i>Surface area or projected area on a plane</i>
<i>Volume</i>	$L^3$	$\lambda^3$	<i>For any portion of the object</i>
<i>Angle</i>	<i>None</i>	<i>1</i>	<i>e.g., between members or solid angle</i>
<i>Radius of Gyration</i>	<i>L</i>	$\lambda$	<i>Measured from a fixed point</i>
<i>Moment of Inertia Area</i>	$L^4$	$\lambda^4$	
<i>Moment of Inertia Mass</i>	$ML^2$	$\lambda^5$	<i>Taken about fixed point</i>
<i>Center of Gravity</i>	<i>L</i>	$\lambda$	<i>Measured from a reference point</i>
<b><u>KINEMATICS &amp; DYNAMICS</u></b>			
<i>Time</i>	<i>T</i>	$\lambda^{1/2}$	<i>Same reference point (e.g., starting time) is considered as zero time</i>
<i>Acceleration</i>	$LT^{-2}$	<i>1</i>	<i>Rate of change of velocity</i>
<i>Velocity</i>	$LT^{-1}$	$\lambda^{1/2}$	<i>Rate of change of displacement</i>
<i>Displacement</i>	<i>L</i>	$\lambda$	<i>Position at rest is considered as zero</i>
<i>Spring Constant (Linear)</i>	$MT^{-2}$	$\lambda^2$	<i>Force per unit length of extension</i>
<i>Damping Coefficient</i>	$MT^{-1}$	$\lambda^{5/2}$	<i>Resistance (viscous) against oscillation</i>

**Tabel 2.1.b.** *Model to Prototype Multiplier for The Variables Commonly Used in Mechanics Under Froude Scaling lanjutan (Chakrabarti, 1994).*

<i>VARIABLE</i>	<i>UNIT</i>	<i>SCALE FACTOR</i>	<i>REMARKS</i>
<u><i>KINEMATICS &amp; DYNAMICS</i></u>			
<i>Damping Factor</i>	<i>None</i>	<i>1</i>	<i>Ration of damping and critical damping coefficient</i>
<i>Natural Period</i>	<i>T</i>	$\lambda^{1/2}$	<i>Period at which inertia force = restoring force</i>
<u><i>WAVE MECHANICS</i></u>			
<i>Wave Height</i>	<i>L</i>	$\lambda$	<i>Consecutive crest to trough distance</i>
<i>Wave Period</i>	<i>T</i>	$\sqrt{\lambda}$	<i>Time between two successive crests passing a point</i>
<i>Wave Length</i>	<i>L</i>	$\lambda$	<i>Distance between two successive crests at a given time</i>
<i>Particle Velocity</i>	$LT^{-1}$	$\sqrt{\lambda}$	<i>Rate of change of movement of a water particle</i>
<i>Wave Elevation</i>	<i>L</i>	$\lambda$	<i>Form of wave (distance from still waterline)</i>
<i>Particle Acceleration</i>	$LT^{-2}$	<i>1</i>	<i>Rate of change of velocity of a water particle</i>
<u><i>STABILITY</i></u>			
<i>Displacement (Volume)</i>	$L^3$	$\lambda^3$	<i>Volume of water moved by a submerged object (or part thereof)</i>
<i>Natural Period</i>	<i>T</i>	$\sqrt{\lambda}$	<i>Period of free oscillation in still water due to an initial disturbance</i>
<i>Metacenter</i>	<i>L</i>	$\lambda$	<i>Instantaneous center of rotation</i>
<i>Center of Buoyancy</i>	<i>L</i>	$\lambda$	<i>Distance of C.G. of displaced volume from a fixed point</i>

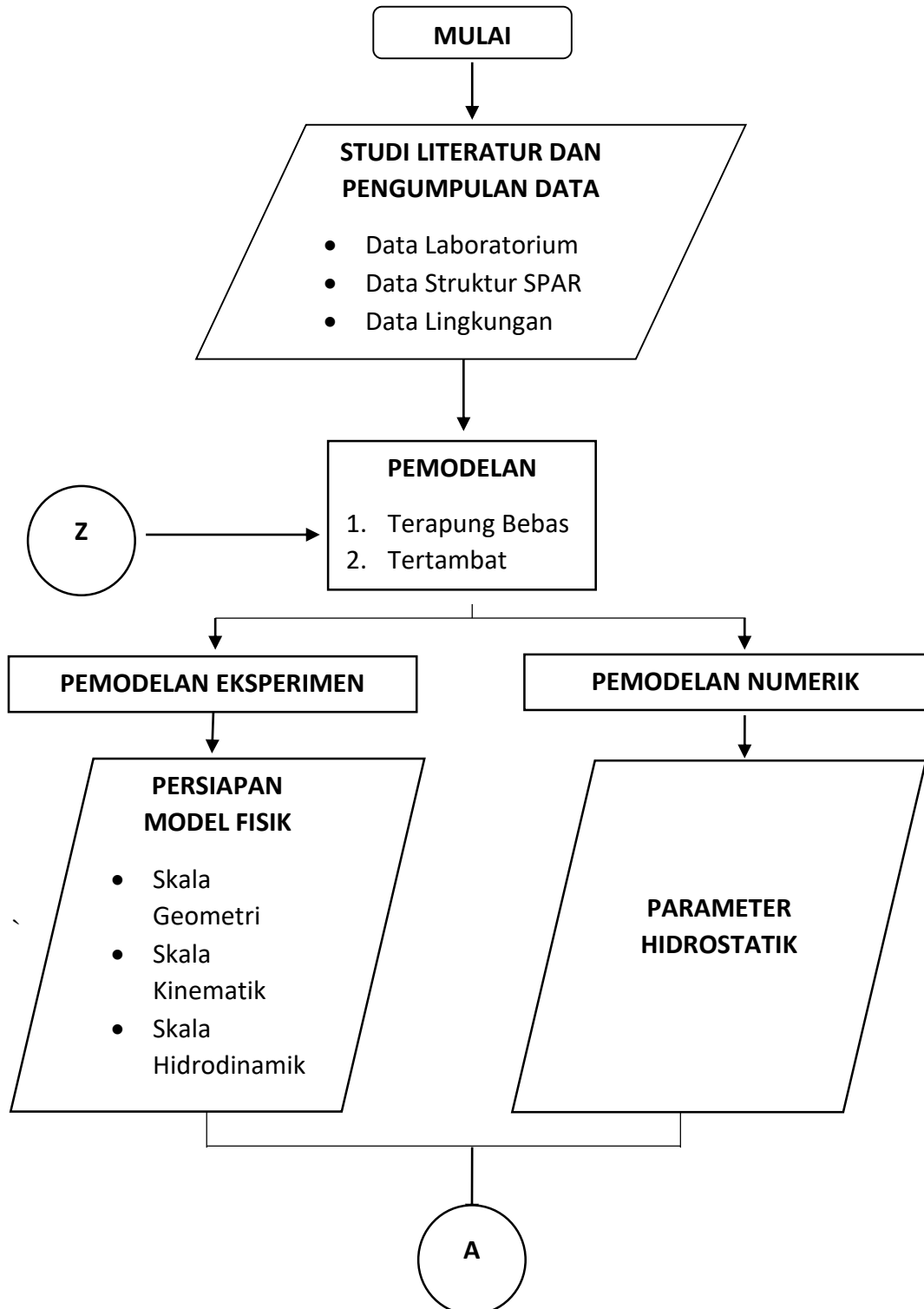
**HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN**

## BAB III

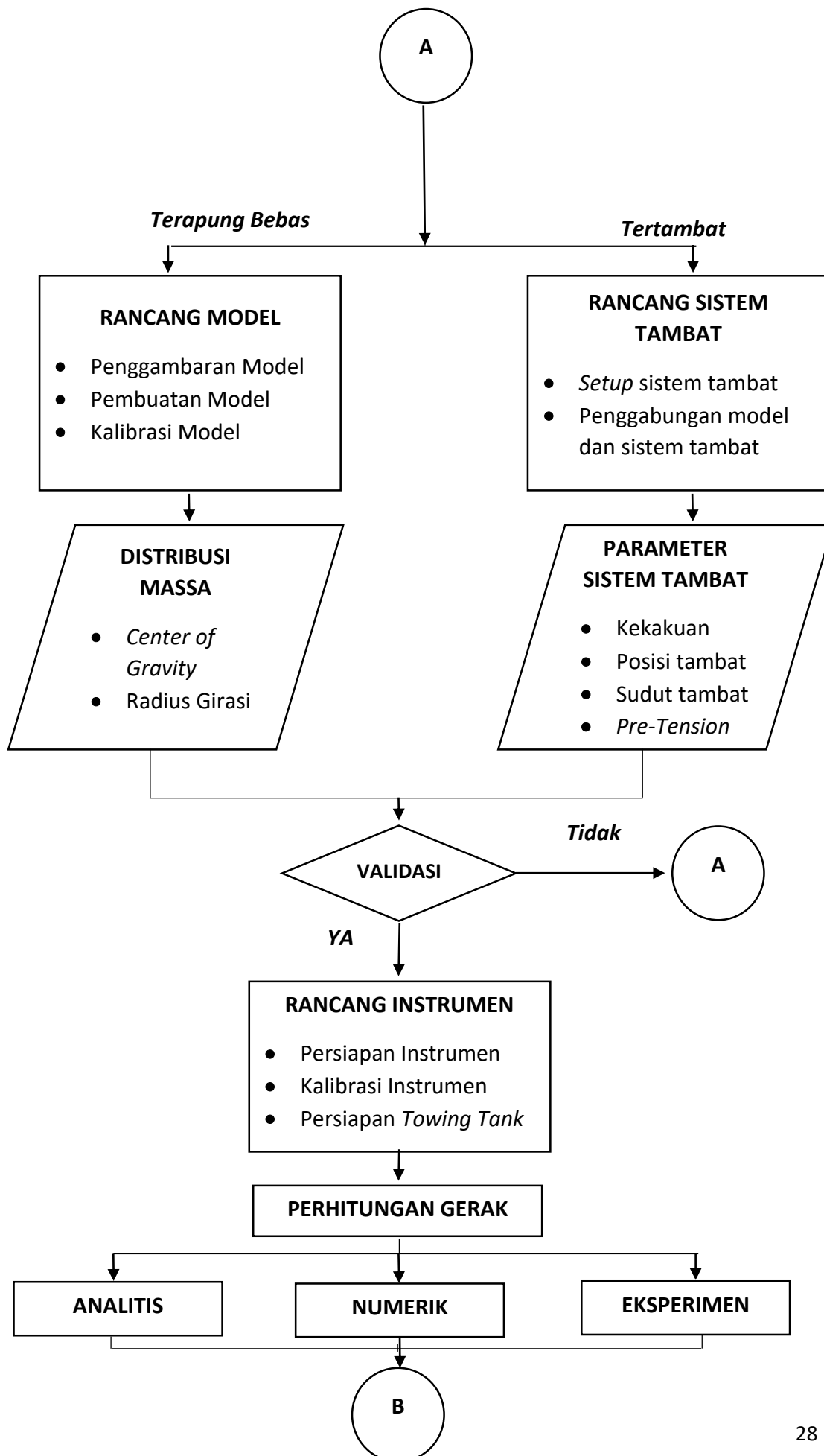
### METODOLOGI PENELITIAN

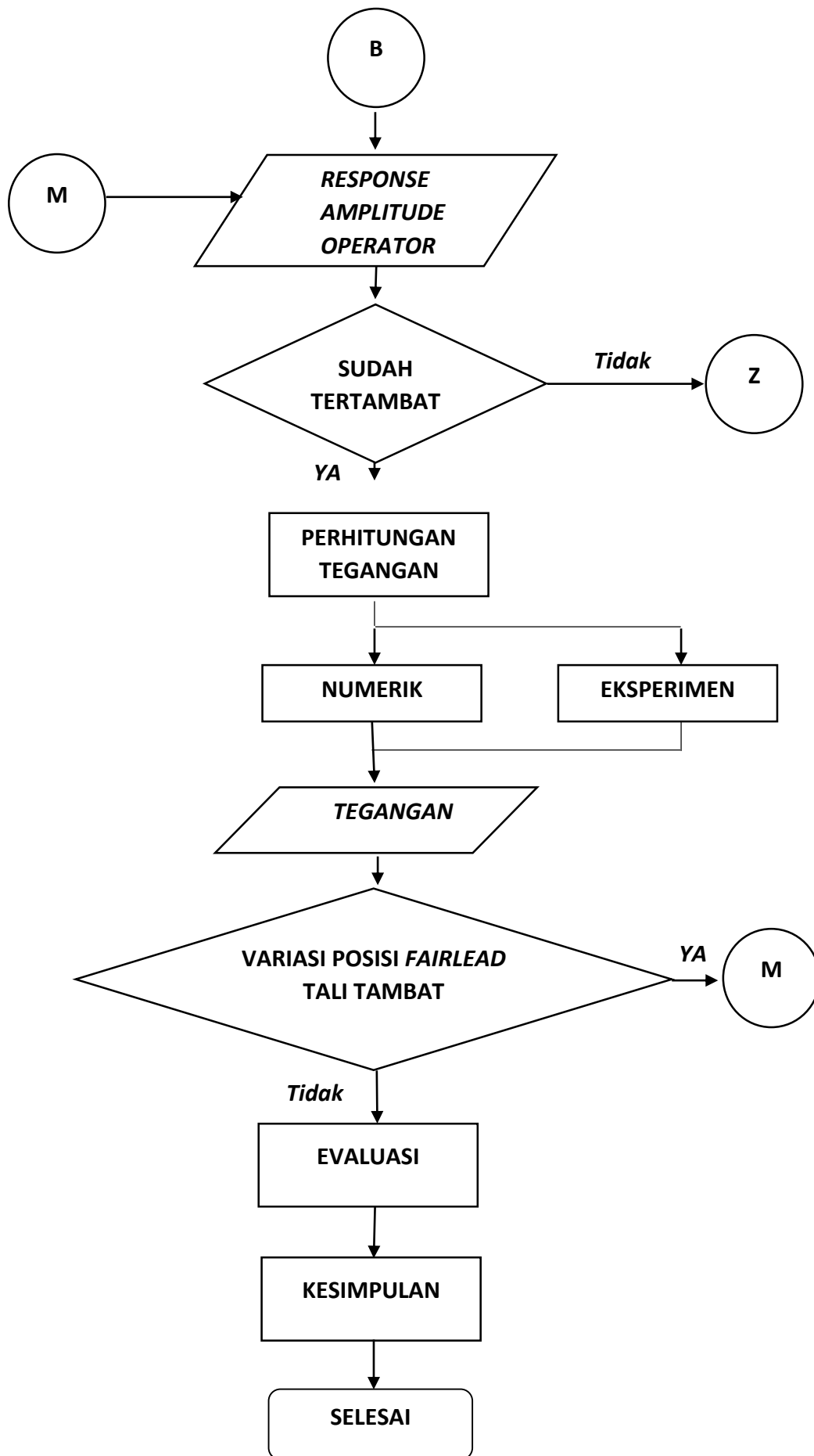
#### 3.1 DIAGRAM ALIR

Diagram alir pengerjaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:









## 3.2 PENJELASAN DIAGRAM ALIR

### 3.2.1 Studi Literatur dan Pengumpulan Data

Langkah pertama yang dilakukan dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah mempelajari berbagai literatur yang berkaitan dengan eksperimen, metode analitis, dan numerik serta mengumpulkan data-data objek maupun pelengkap untuk pemodelan. Struktur SPAR yang akan dimodelkan mengacu pada model Mini Spar dari *Spar Model Test Joint Industry Project* yang bisa dilihat pada tabel 3.1. Modifikasi yang dilakukan pada struktur yaitu penggunaan tambat berjumlah 4 *line* yang simetri serta konfigurasi massa dari struktur yang menyesuaikan *center of gravity* dan radius girasi sesuai data yang diperoleh. Selain itu untuk data lingkungan dan panjang tali tambat menyesuaikan kemampuan dari *towing tank*. Table 3.3 menunjukkan data lingkungan dari Small SPAR. Dimensi *towing tank* dapat dilihat di Table 3.2. Percobaan dilakukan di Laboratorium Hidrodinamika FTK-ITS.

**Tabel 3.1.a.** Data Small SPAR (Deep Oil Technology Inc., 1995).

<i>Description</i>	<i>Prototype</i>	<i>Unit</i>
<b><u>Hull</u></b>		
<i>Diameter</i>	16.00	m
<i>Draft</i>	135.03	m
<i>Length</i>	154.23	m
<i>Fairlead Depth</i>	12.74	m
<b><u>Deck</u></b>		
<i>Length</i>	50.29	m
<i>Width</i>	50.29	m
<i>Height</i>	19.57	m

**Tabel 3.1.b.** Data Small SPAR lanjutan.

<i>Description</i>	<i>Prototype</i>	<i>Unit</i>
<b><u>Mass Distribution</u></b>		
<i>Weight</i>	2653.16	Ton
<i>KG</i>	62.02	m
<i>Pitch Gyradius</i>	61.47	m
<i>Roll Gyradius</i>	61.47	m

**Tabel 3.2.** Data *Towing Tank* Laboratorium Hidrodinamika FTK-ITS.

<b>Deskripsi</b>	<b>Kuantitas</b>	<b>Satuan</b>
Panjang	50	m
Lebar	3	m
Kedalaman (penuh)	2	m
Kedalaman (operasi)	1.8	m
Temperatur	27	°C
Jendela Observasi ( <i>Toughned Glass</i> )	4	buah

### 3.2.2 Pemodelan Eksperimen dan Numerik.

Langkah selanjutnya adalah pemodelan Small SPAR. Langkah ini terdiri dari dua kondisi pemodelan yaitu kondisi terapung bebas dan kondisi tertambat. Kedua kondisi tersebut nantinya akan dianalisis melalui pemodelan eksperimen dan numerik.

- Pemodelan Eksperimen

Pada pemodelan eksperimen terlebih dahulu dilakukan persiapan model fisik dari Small SPAR. Tahap ini meliputi penskalaan model dari segi geometri prototipe, kinematik, dan hidrodinamik sistem. Penskalaan Geometri dilakukan dengan menyesuaikan kondisi Laboratorium Hidrodinamika serta material model yang tersedia di pasaran. Selain itu

pada tahap penskalaan hidrodinamik, digunakan Hukum Model Froude karena hanya terbatas memperhatikan gaya inersia dan gravitasi.

- **Pemodelan Numerik**

Selanjutnya mengenai pemodelan numerik yang pada awalnya adalah menentukan parameter hidrostatik dari struktur Small SPAR. Parameter hidrostatik ditentukan untuk mengetahui sifat-sifat badan bangunan terapung yang terendam di dalam air. Parameter tersebut dibutuhkan untuk *input* pemodelan numerik pada perangkat lunak Bentley MOSES.

### 3.2.3 Validasi Model

Pada tahap ini, model dikatakan valid jika *error* yang didapatkan pada pemodelan numerik dan eksperimen adalah tidak lebih dari 5% terhadap data acuan. Parameter-parameter yang perlu dilakukan validasi diantaranya:

- *Displacement*
- Titik pusat masa (*Centre of Gravity*) sumbu x (LCG), sumbu y (TCG) dan sumbu z (VCG)
- Jari-jari girasi sumbu x ( $R_x$ ), sumbu y ( $R_y$ ) dan sumbu z ( $R_z$ )
- Jari-jari metacenter melintang ( $BM_T$ )
- Jari-jari metacenter memanjang ( $BM_L$ )
- Tinggi metacenter melintang ( $GM_T$ )
- Tinggi metacenter memanjang ( $GM_L$ )

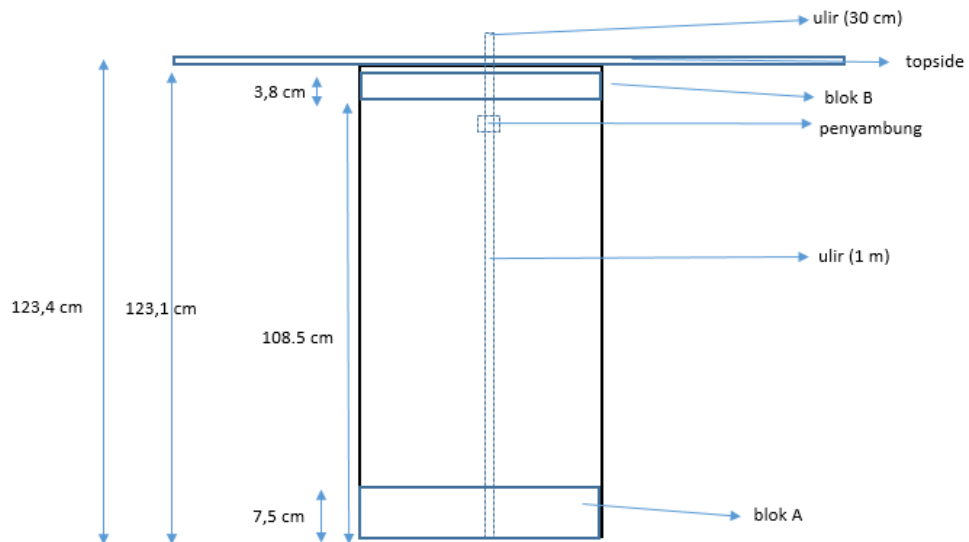
Pada uji eksperimen ini, data yang diperoleh adalah *displacement*, KG,  $R_x$ , dan  $R_y$ . Sehingga validasi hanya lakukan pada parameter-parameter tersebut.

### 3.2.4 Rancang Model

Setelah didapat dimensi awal model (draft, KG, jari-jari girasi, lebar dan panjang) dengan menggunakan pemodelan geometri dibuat penggambaran model secara kasar secara menyeluruh dengan menggunakan perangkat lunak Autocad. Dalam tahap ini hanya digambarkan model spar bagian luar dari keel hingga topside.

Dalam pembuatan model ini dikerjakan bersamaan dengan penggambaran model karena dalam penggambaran model harus sesuai dengan bahan yang ada di pasaran. Untuk hull dari SPAR digunakan paralon dengan diameter 5 inch. Dan untuk struktur dasar (keel) dan deck digunakan akrilik. Selanjutnya

untuk kompartemen digunakan besi yang berbentuk silinder pipih yang dijadikan sebagai ballast. Dalam pengaturan ballast digunakan sebuah silinder pejal yang berulir sehingga silinder pipih dapat diatur sesuai kebutuhan. Berikut merupakan rencana model yang akan dibuat untuk eksperimen.



**Gambar 3.1.** Rencana Desain Model SPAR.

### 3.2.5 Kalibrasi Model

Kalibrasi dilakukan untuk memenuhi parameter dimensi yang sudah disesuaikan dengan hasil pemodelan geometri. Jadi dari dalam pembuatan dan penggambaran model dilakukan kalibrasi terus menerus agar mendekati dengan model aslinya. Pada awalnya dimensi harus disesuaikan seperti panjang, lebar dan draft. Setelah itu baru distribusi massa dari model SPAR seperti COG dan radius girasi. Dan pada penelitian ini model dinyatakan valid / sesuai jika error yang terjadi kurang dari 5% dari model aslinya.

### 3.2.6 Rancang Sistem Tambat

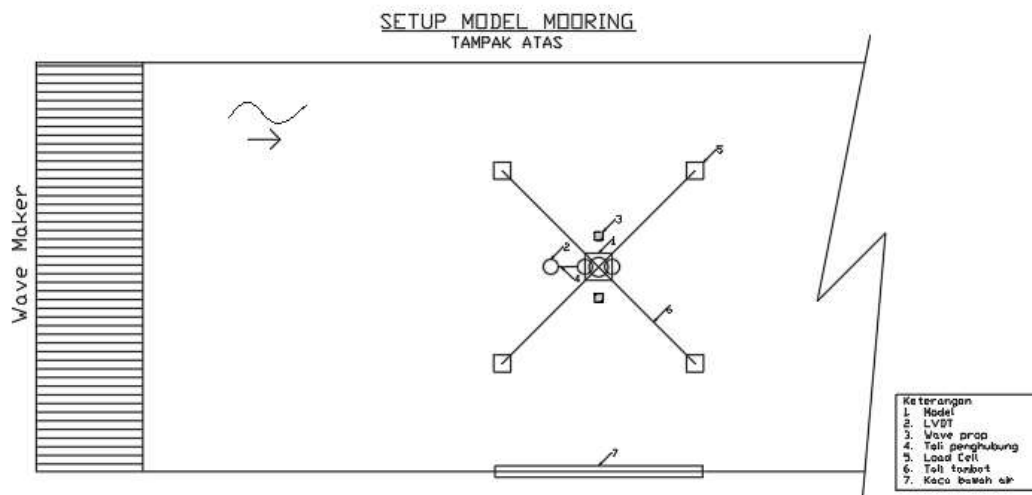
Pada tahap ini, dilakukan perancangan sistem tambat yang akan digunakan pada model SPAR sebelum dilakukan eksperimen di laboratorium hidrodinamika ITS. Gambar 3.2. menunjukkan layout dari sistem tambat. Secara garis besar, tahap ini terdiri atas dua point utama yaitu setup sistem tambat dan penggabungan model dengan sistem tambat. Berikut ini merupakan penjelasan untuk tiap point utama yang dibahas.

- Setup sistem tambat

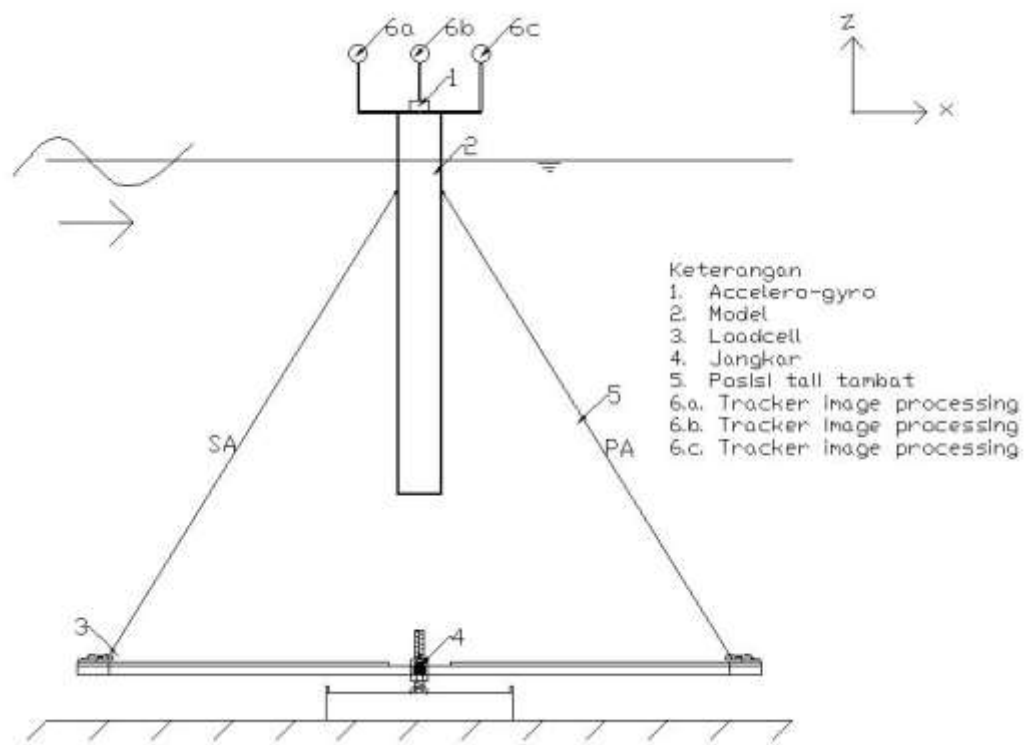
Sistem tambat yang digunakan pada model terdiri dari empat buah mooring line yang dihubungkan dengan menggunakan fairlead. Alat-alat yang diperlukan dalam setup sistem tambat ini antara lain :

1. *mooring line* sebanyak 4 buah
2. Load Cell sebanyak 4 buah untuk pengukuran tegangan tali
3. Jangkar di dasar untuk peletakan load cell serta pengaturan sudut tali
4. *Fairlead* berupa kait untuk memasang mooring line di model SPAR yang akan diuji sebanyak 4 buah

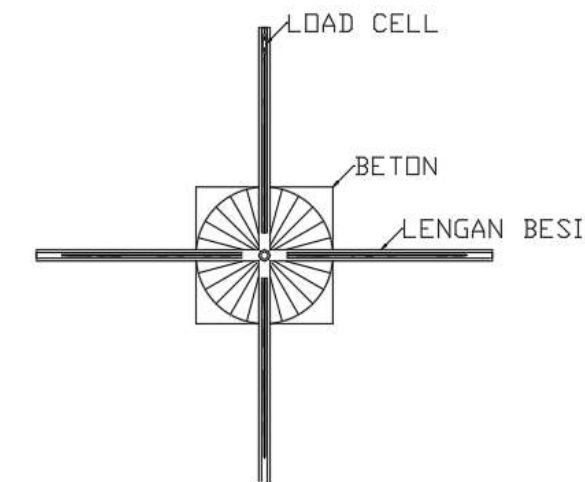
Berikut merupakan gambar tampak atas dari setup model mooring yang akan diatur di laboratorium hidrodinamika ITS.



**Gambar 3.2.** Tampak Atas Rencana Sistem Tambat pada Eksperimen.



**Gambar 3.3.** Tampak Samping Rencana Sistem Tambat dan Model SPAR.



**Gambar 3.4.** Tampak Atas Rencana Jangkar.

### 3.2.7 Parameter Sistem Tambat

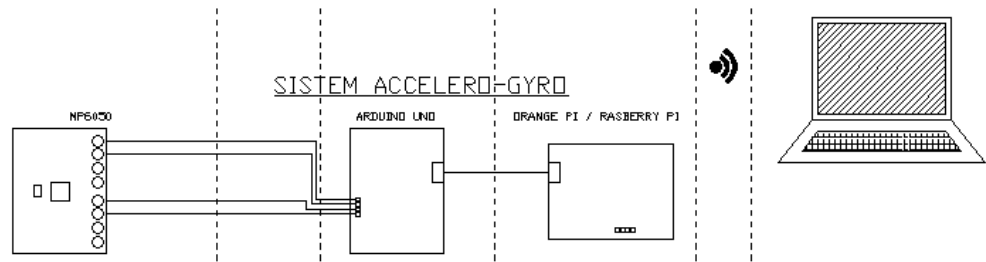
Pada tahap ini, parameter sistem tambat yang digunakan pada model SPAR akan dijelaskan secara detail. Parameter sistem tambat yang digunakan antara lain kekakuan tali tambat, posisi tambat, sudut tambat dan pre-tension tali tambat. Berikut ini adalah penjelasan dari tiap parameter sistem tambat yang digunakan.



- Kekakuan tali tambat  
Kekakuan tali tambat dipengaruhi oleh properties dari material yang digunakan. Modulus elastisitas material mempengaruhi kekakuan tali tambat yang digunakan. Semakin besar kekakuannya, semakin besar pula periode natural dari struktur.
- Posisi *Fairlead*  
*Fairlead* berfungsi untuk menyambungkan *mooring line* dengan model. Posisi tambat pada model SPAR yang mengacu pada laporan *Joint Integrated Project* (1995) berada di atas titik pusat massa SPAR. Data posisi *fairlead* terdapat pada tabel 3.1.a.
- Sudut *Fairlead*  
Sudut *fairlead* dari *mooring line* yang digunakan pada analisa model SPAR ini adalah sebesar 30 derajat. Sudut ini didapatkan ketika tali di setting dalam keadaan tegang.
- Jenis Sistem Tambat  
Pada tugas akhir ini, jenis sistem tambat yang digunakan pada saat eksperimen adalah sistem tambat *taut*.

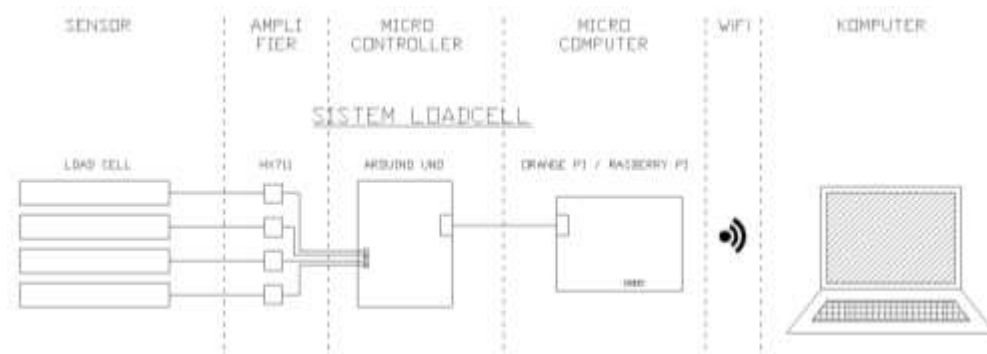
### 3.2.8 Instrumen Laboratorium

- 1) Gyroscope merupakan sensor gyro yang digunakan untuk menentukan orientasi gerak dengan prinsip ketetapan momentum sudut yang mendeteksi gerakan sesuai gravitasi. Keluaran dari Gyroscope berupa kecepatan sudut dari tiga sumbu yang ditinjau. Gerak rotasional sumbu y (pitch) dari model SPAR diukur menggunakan giroskop. Instrumen giroskop yang digunakan adalah giroskop MPU 6050 GY87. Instrumen ini mampu mengeluarkan sudut yang dibentuk oleh MPU 6050. Pada MPU 6050 terdapat sumbu orientasi x, y dan z sebagai orientasi nilai yang dihasilkan keluaran dari MPU 6050. Tegangan yang sudah diamplifikasi akan diterima oleh microcontroller Arduino UNO untuk kemudian ditransfer ke laptop dalam angka angka digital. merupakan sebuah sensor yang dapat mencatat gerakan yang terjadi dalam 6 derajat kebebasan. Gambar 3.5 menjelaskan tentang pengukuran gerak menggunakan Gyroscope.



**Gambar 3.5.** Diagram Sistem Accelero-gyro

- 2) Load Cell digunakan untuk mengukur tegangan tali maksimum pada sistem tambat ketika eksperimen model SPAR. Untuk mengukur tegangan tali ini, pada *Load Cell* terdapat sensor *strain gauge* yang mengukur tegangan yang diberikan oleh tali dengan cara mengubah suatu gaya tekanan menjadi besaran listrik. Perubahan tegangan tali ini akan memberi sinyal tegangan listrik. Tegangan listrik yang dihasilkan *loadcell* akan diperbesar menggunakan *amplifier* yang kemudian akan di digitasi menggunakan *microcontroller* yang kemudian akan berubah menjadi data digital di laptop.



**Gambar 3.6.** Diagram Sistem Load Cell yang digunakan pada eksperimen

- 3) *Digital image processing* adalah proses pengolahan gambar dua dimensi oleh perangkat komputer. *Digital image processing* merupakan proses pengambilan atribut-atribut pada gambar dengan input dan output berupa gambar. Pada penelitian ini, *Digital image Processing* dimanfaatkan untuk pendeteksian objek pada video yang digunakan untuk menganalisa gerakan translasi naik-turun (heave) dan maju-mundur (surge) yang terjadi pada objek berupa model SPAR yang

mengapung di dalam air dan terkena gelombang dengan variasi periode gelombang.

Pada penelitian ini, model SPAR yang mengapung di air dipasang tiga buah tutup botol berwarna merah yang digunakan untuk menganalisa gerak pada objek. Warna merah dipilih untuk menghindari kesamaan warna dengan objek yang lain dimana untuk model SPAR warna yang digunakan adalah hijau dan kuning, warna air kolam uji adalah biru dan warna dinding di laboratorium Hidrodinamika ITS adalah putih. Dari kondisi tersebut, dipilihlah warna merah yang digunakan untuk analisa image processing ini agar data dapat dibaca secara akurat dan output yang diharapkan tidak mengalami error. Objek yang ditinjau adalah tutup botol yang berada di titik pusat model sedangkan tutup botol yang diletakkan di ujung model digunakan untuk perhitungan skala pixel dan validasi data yang dihasilkan. Proses image processing ini dilakukan dengan menggunakan satu buah kamera webcam logitech c270 yang merekam video dimana dari video tersebut terdiri dari banyak frame-frame yang kemudian diolah menggunakan bantuan perangkat lunak visual basic c++. Gambar 3.7. dibawah ini merupakan kamera dan objek benda tracking yang digunakan dalam *image processing*.



**Gambar 3.7.** Kamera dan benda yang ditracking

### 3.2.9 Metode Analitis

Dalam metode analitis, perhitungan gaya beban dilakukan dengan perhitungan gaya Froude Krylov. Gaya ini kemudian akan diolah menjadi respon gerak. Perhitungan dilakukan pada kondisi terapung bebas dan kondisi tertambat. Perhitungan hanya dibatasi untuk melakukan perhitungan di mode gerak *surge*, *heave* dan *pitch*. *Output* dari perhitungan gerak secara analitik adalah diagram RAO untuk *surge*, *heave* dan *pitch* baik dalam kondisi terapung bebas atau tertambat

Perhitungan tegangan tali, dapat dilakukan dengan menggunakan gerak total dari struktur akibat pengaruh mooring. Dengan diketahui gerak total maka akan diketahui juga deformasi tali. Dengan menganggap kekakuan tali tambat line konstan (*taut mooring*), tegangan tali tambat dapat diketahui dengan mengalikan deformasi dengan kekakuan. *Output* yang diharapkan adalah adanya *Tension Response Operator*.

### 3.2.10 Metode Numerik

Pada tahap ini, dilakukan analisa RAO prototype yang digunakan sebagai acuan model sesuai dengan data dari penelitian Joint Industry Project (JIP) dalam keadaan terapung bebas dan bertambat dengan analisa panel 3D Diffraction method menggunakan bantuan perangkat lunak MOSES. Tahap analisa untuk perhitungan numerik RAO dalam keadaan terapung bebas adalah sebagai berikut :

- Prototype SPAR dari data penelitian JIP dimodelkan sesuai dengan dimensi yang ada menggunakan perangkat lunak MOSES. Kemudian, model di bagi menjadi elemen-elemen kecil menggunakan metode difraksi. Proses ini dilakukan pada MOSES tipe file .dat yang khusus digunakan untuk memodelkan struktur yang dianalisa.
- Setelah itu, data *properties* dari struktur di inputkan pada tipe file .cif untuk analisa model yang telah dibuat pada file .dat. Secara analitis, dalam menganalisa perilaku gerak suatu benda digunakan prinsip hukum newton III yaitu gaya aksi = gaya reaksi atau dalam bentuk persamaan dapat dituliskan sebagai berikut,  $m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = F_{wave}$  .

- *Displacement* merupakan massa dari struktur ditambah dengan *added mass* struktur itu sendiri. Data yang diperlukan untuk mendapatkan besar dari *displacement* struktur itu sendiri adalah nilai dari *Center of Gravity* (COG) struktur, sarat (*draught*) struktur dan radius girasi struktur.
- Gaya redaman (*damping force*) dari struktur dapat diperoleh dari input perintah Tanaka pada MOSES yang mendefinisikan faktor pengali untuk *damping* yang disebabkan “*eddy making*”. Formulasi yang digunakan untuk gaya redaman Tanaka ini dijelaskan oleh Schmidke pada papernya yang berjudul : *The Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers* (1978). Bangunan SPAR yang dianalisa ini tidak perlu ditambahkan faktor *roll damping*.
- Gaya kekakuan dipengaruhi oleh gerak *heave*, *pitch* dan *roll* pada kondisi *free floating*. Pada MOSES untuk analisa gaya kekakuan ini disesuaikan dari sarat struktur (mempengaruhi volume dan *water plane area*) dan juga *center of gravity* struktur.
- Gaya gelombang, didapatkan dari input frekuensi/periode gelombang yang ditinjau dimana untuk periode gelombang di laut sendiri berkisar antara 3-20 detik.
- MOSES nantinya akan memberikan keluaran hasil analisa berupa *Response Amplitude Operator* (RAO) struktur dalam keadaan *free floating* untuk tiap gerakan translasi (*surge*, *sway*, *heave*) dan rotasi (*roll*, *pitch*, *yaw*) yang terjadi untuk tiap frekuensi gelombang dan arah gelombang yang ditinjau.

Sedangkan, tahapan analisa untuk perhitungan numerik RAO dalam keadaan tertambat adalah sebagai berikut :

- Prinsip utama dari digunakannya *mooring system* pada suatu struktur sendiri adalah untuk menambahkan kekakuan pada sistem struktur tersebut sehingga dapat memperkecil gerakan yang terjadi baik itu translasi maupun rotasi ketika terkena beban dari luar.
- *Mooring system* pada perangkat lunak MOSES dapat di inputkan pada file.cif dengan menggunakan perintah MEDIT. Perintah MEDIT ini

digunakan untuk menginputkan koordinat dari *mooring line* yang dipasang pada struktur, jenis dari *mooring line* yang digunakan (*taut mooring* atau *catenary mooring*), diameter *mooring line*, kedalaman perairan, panjang *mooring line*, diameter *buoyancy* dan berat *mooring line* per satuan panjang, lokasi dari jangkar di *seabed*, dan juga sudut *mooring line*.

- *Pre-tension Mooring line* dapat diinputkan pada MOSES dengan menggunakan perintah -A\_TENSION untuk tiap *mooring line* yang ditinjau.
- MOSES nantinya akan memberikan keluaran hasil analisa berupa *Response Amplitude Operator* (RAO) struktur dalam keadaan tertambat untuk tiap gerakan translasi (*surge, sway, heave*) dan rotasi (*roll, pitch, yaw*) yang terjadi untuk tiap frekuensi gelombang dan arah gelombang yang ditinjau.

### 3.2.11 Metode Eksperimen

Eksperimen model dilakukan dalam 2 tahap yaitu uji model tanpa tali tambat (*free floating*) dan model dengan tali tambat (*mooring*) dengan variasi konfigurasi tali. Variasi konfigurasi tali dilakukan dengan menambahkan panjang tali pada *mooring line*. Berikut merupakan langkah yang dilakukan dalam perhitungan eksperimen :

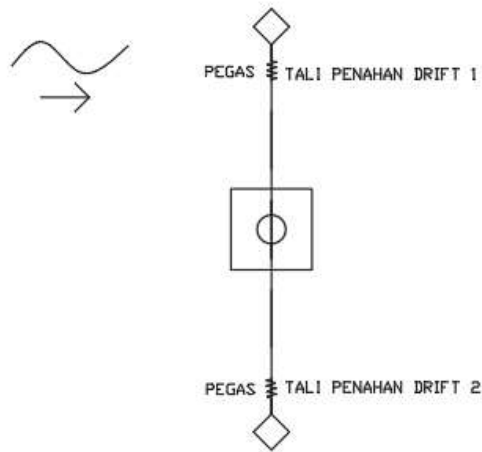
*Run model tanpa tali tambat (free floating)*

1. Persiapkan model yang telah dibuat dan alat uji yang digunakan.
2. *Gyroscope* dipasang di *topside* model SPAR tegak lurus dengan titik berat model untuk mengukur gerakan *pitch*. Kamera di depan model dipasang untuk tracking objek bola yang ada di *topside* untuk merekam gerak *surge* dan *heave* menggunakan *image processing*.
3. Model yang sudah divalidasi diletakkan di lokasi yang sudah direncanakan pada *towing tank*. Persiapan eksperimen di *towing tank* ini perlu sekali diperhatikan untuk menjaga air selalu dalam keadaan tenang untuk mengurangi faktor-faktor yang tidak dibutuhkan agar perhitungan dapat dianggap valid.

4. Dalam kondisi *free floating* juga dipasang tali penahan drift (*loose rope*) untuk mengakomodir gerak *drift* dari model agar model tidak bergeser terlalu jauh dari posisi awal yang dapat mengganggu proses perekaman data.
5. Kemudian dilakukan evaluasi apakah model sudah berada di lokasi yang direncanakan atau belum dan pastikan juga air dalam towing tank sudah cukup tenang untuk dilakukan run gelombang.
6. Setelah semua dipastikan sesuai dengan syarat uji run gelombang maka eksperimen dapat dimulai. Jika belum sesuai, maka perlu dilakukan *setup* ulang.
7. Uji *run* gelombang dilakukan dalam beberapa variasi periode gelombang. Periode gelombang akan disesuaikan dengan hasil penyekalaan periode gelombang di laut (berkisar antara 5-40s) dengan faktor skala yang digunakan. Dari hasil skala didapatkan periode gelombang yang digunakan adalah sebagai berikut :

**Tabel 3.3.** Periode gelombang yang digunakan dalam eksperimen

No	Periode Gelombang (s)
1	3,6 detik
2	3,1 detik
3	2,7 detik
4	2,2 detik
5	1,8 detik
6	0,9 detik
7	0,5 detik



**Gambar 3.8.** Konfigurasi tali penahan gerak *drifting*

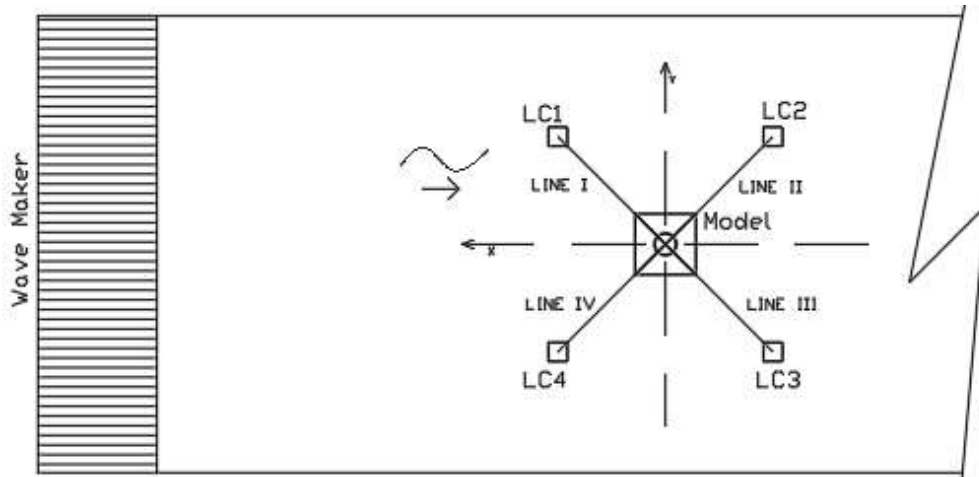
8. Dari hasil pengukuran menggunakan image processing dan gyroscope didapatkan data gerakan model untuk tiap gerakan yang ditinjau yang kemudian diolah untuk menapat respon gerakanya.
9. Hasil pengukuran akan digambarkan dalam bentuk grafik Respons Amplitude Operator (RAO) gerak dari model SPAR untuk gerakan *surge*, *heave* dan *pitch*.

#### *Run model dengan tali tambat (mooring)*

Eksperimen model dengan tali tambat ini memiliki langkah yang hampir sama dengan tanpa tali tambat. Dalam kondisi tertambat tegangan tali juga diperhitungkan dengan menambah instrumen *load cell*.

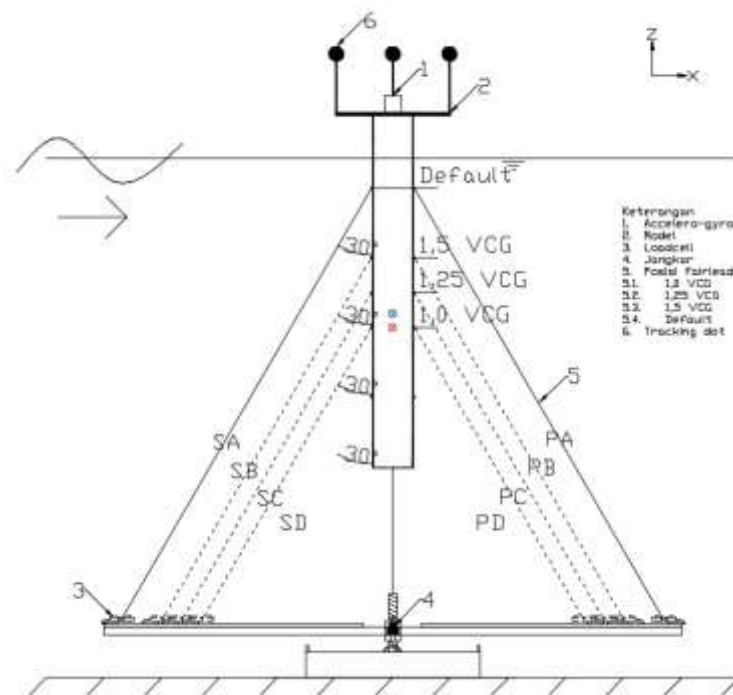
1. Jangkar diletakkan di dasar kolam untuk mengikat tali tambat agar mendekati kondisi asli di lepas pantai yang diikatkan di dasar laut. Jangkar dilengkapi dengan *load cell* untuk mengukur tegangan tali.
2. Pengaturan posisi jangkar dengan menggerakkan load cell mendekati atau menjauhi model struktur.
3. Pengaturan konfigurasi tali dilakukan dengan menarik tali sehingga sesuai konfigurasi tali (*taut* atau *catenary*) yang dikehendaki.
4. Dilakukan evaluasi apakah *setup* model sudah sesuai dengan rencana atau belum. Jika belum sesuai dengan rencana penelitian maka perlu dilakukan *setup* kembali. Jika sudah sesuai dengan rencana, maka eksperimen dapat dimulai.





**Gambar 3.9.** Konfigurasi eksperimen model SPAR tertambat

5. Selama eksperimen output dari *load cell*, *Image Processing* dan Giroskop akan diamati untuk perhitungan gerak struktur dan tegangan tali
6. Eksperimen ini dilakukan dengan variasi konfigurasi tali sebagai berikut :
  - Konfigurasi tali dari *mooring line* di variasikan dari keadaan 1.5 VCG, 1.25 VCG, hingga 1 VCG. Variasi ini dilakukan dengan menjaga sudut antara tali tambat dengan model SPAR sebesar 30 derajat untuk setiap variasinya. Uji *run* gelombang dilakukan pada setiap variasi konfigurasi tali yang direncanakan. Jadi, setiap sekali uji *run* gelombang model tertambat dengan konfigurasi tali awal sampai keluar hasil pengukuran, setelah data hasil pengukuran didapatkan konfigurasi tali diatur kembali dengan menambahkan panjangnya kemudian *run* gelombang dilakukan kembali dan seterusnya sampai semua konfigurasi tali yang direncanakan diuji.



**Gambar 3.10.** Setup model dengan variasi posisi *fairlead* 1.5 VCG, 1.25 VCG, dan 1 VCG.

### 3.3 TIMELINE

Proses penelitian ini akan berlangsung selama V bulan dengan rincian sebagai berikut:

No	Kegiatan	Bulan I				Bulan II				Bulan III				Bulan IV				Bulan V			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
1	Studi Literatur dan Pengumpulan Data																				
2	Permodelan Eksperimen																				
3	Persiapan Model Fisik																				
4	Permodelan Numerik																				
5	Rancang Model dan Sistem Tambat																				
6	Rancang Instrumen																				
6	Perhitungan Gerak																				
	Analitis																				
	Numerik																				
	Eksperimen																				
7	Perhitungan Tegangan																				
	Analitis																				
	Numerik																				
	Eksperimen																				
8	Penyusunan Laporan																				

**HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN**

## BAB IV

### ANALISIS DAN PEMBAHASAN

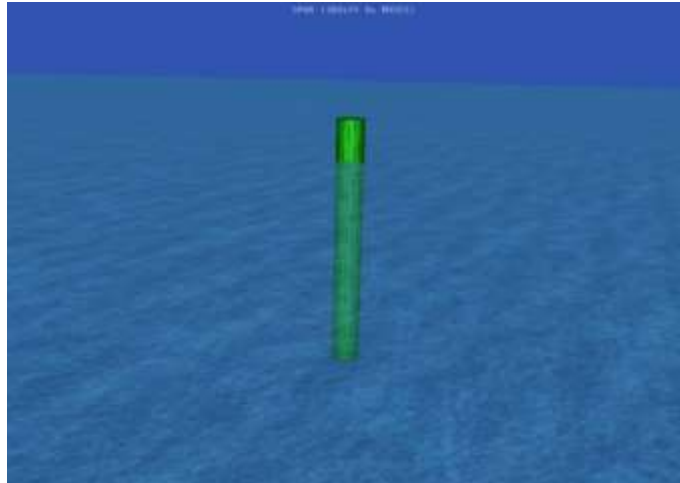
#### 4.1. PEMODELAN STRUKTUR

##### 4.1.1. Pemodelan Numerik

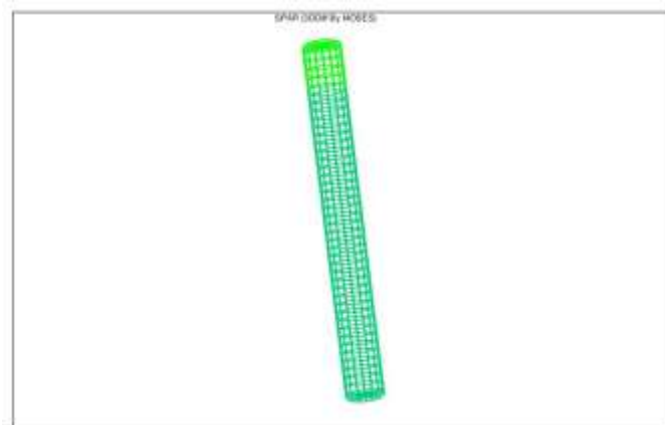
Perhitungan numerik dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak MOSES Editor 7. Langkah yang perlu dilakukan adalah memberi perintah membuat lingkaran di file ekstensi .dat MOSES. Tabel 4.1 menampilkan dimensi dari SPAR yang digunakan untuk pemodelan numerik. Data SPAR diambil dari Mini SPAR *Joint Industry Project* (1995). Model yang dibuat di MOSES di-*meshing* dengan ukuran *panel* maksimal sebesar 3.5 m. Model numerik yang sudah di-*meshing* terlihat di Gambar 4.1, Gambar 4.2 dan Gambar 4.3.

**Tabel 4.1.** Data dimensi struktur SPAR. (Joint Industry Project, 1995)

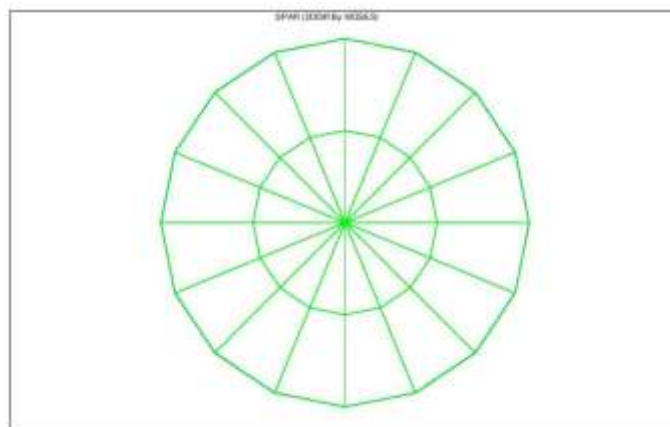
Deskripsi	Prototype	
	Besaran	Satuan
Diameter	16.00	m
Draft	135.03	m
Tinggi	154.23	m
Posisi <i>Fairlead</i>	12.74	m
Panjang <i>deck</i>	50.29	m
Lebar <i>deck</i>	50.29	m



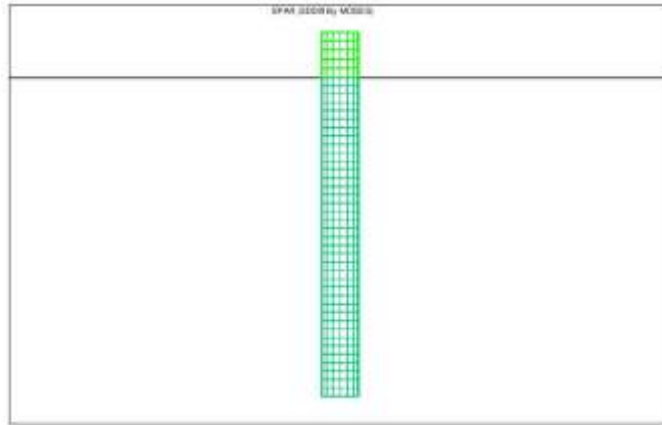
**Gambar 4.1.** Tampak isometri model numerik.



**Gambar 4.2.** Tampak isometri model numerik dengan *meshing*.



**Gambar 4.3.** Tampak atas model numerik dengan *meshing*.



**Gambar 4.4.** Tampak depan model numerik dengan *meshing*.

Pemodelan dengan menggunakan MOSES juga dilakukan dengan memasukan sarat dan jari-jari girasi. Bagian struktur (Gambar 4.2 dan 4.4) yang berwarna hijau tua menunjukkan bagian di bawah air, sedangkan yang berwarna hijau muda merupakan bagian tidak di atas air. Jari-jari girasi SPAR dimasukkan ke dalam MOSES sesuai dengan Tabel 4.2.

**Tabel 4.2.** Distribusi massa SPAR. (Joint Industry Project, 1995)

Deskripsi	Prototype	
	Besaran	Satuan
Massa Total	26531.5	Ton
<i>Keel to Gravity (KG)</i>	62.02	m
Jari-jari girasi gerak <i>pitch</i>	61.47	m
Jari-jari girasi gerak <i>roll</i>	61.47	m

#### 4.1.2. Pemodelan Eksperimen

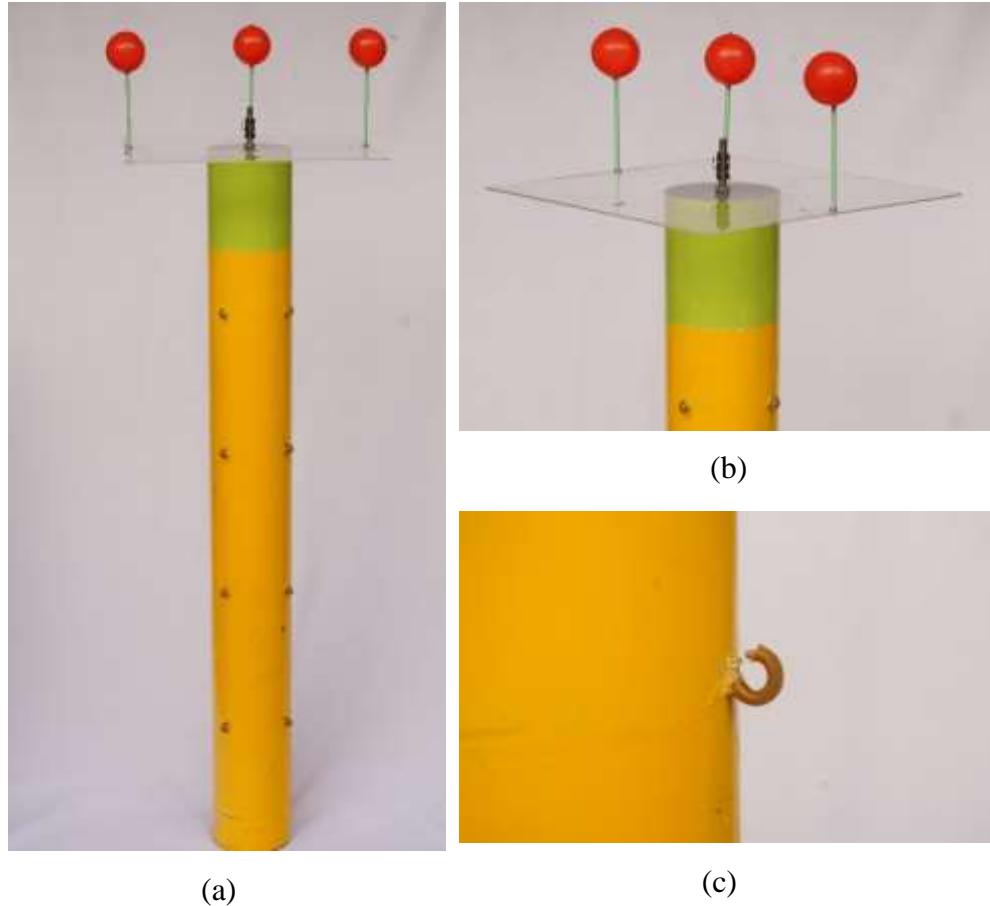
Dalam melakukan studi eksperimen, SPAR dimodelkan menggunakan skala 1:125. Proses penskalaan yang dilakukan mengikuti aturan Froude sesuai Tabel 4.3.

**Tabel 4.3.** Hasil penskalaan model SPAR sesuai dengan hukum Fraude.

	<b>Prototype</b>	<b>Faktor skala</b>	<b>Model</b>
Massa (kg)	26531524.910	$\lambda^3$	13.584
Diameter (m)	16.000	$\lambda$	0.128
Draft (m)	135.010	$\lambda$	1.080
Panjang (m)	154.210	$\lambda$	1.234
KG (m)	62.022	$\lambda$	0.496
Radius girasi pitch (m)	61.470	$\lambda$	0.492
Radius girasi roll (m)	61.470	$\lambda$	0.492
Periode gelombang (s)	40, 35, 30, 25, 20, 10, 5.5	$\lambda^{1/2}$	3.6, 3.1, 2.7, 2.2, 1.8, 0.9, 0.5

Dimensi dari *prototype* dan model fisik dapat dilihat di Tabel 4.1. Pipa PVC digunakan sebagai lambung, akrilik sebagai geladak dan kait sebagai *fairlead*. Perakitan model dilakukan di Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS. Pipa PVC 5” digunakan untuk menyesuaikan ukuran diameter dari model. Pipa tersebut kemudian dipotong sesuai dengan tinggi lambung. Bagian bawah dari pipa PVC ditutup dengan akrilik. Akrilik pada bagian bawah ditempel ke pipa PVC menggunakan lem lalu diberi dempul untuk menghindari kebocoran. Untuk memastikan tidak adanya kebocoran pada model, dilakukan tes terapung selama 24 jam di *towing tank*. Model yang sudah jadi kemudian dicat dengan warna kuning dan hijau bertujuan agar warna model kontras dengan warna air seperti Gambar 4.5.

Setelah dimensi utama dari model fisik sudah terpenuhi, distribusi massa dari model fisik juga dimodelkan. Distribusi massa dari SPAR terdapat pada Tabel 4.2. Di dalam lambung model fisik diberi besi ulir dan silinder untuk mengatur distribusi beban dari model fisik dapat dilihat pada Gambar 4.6.



**Gambar 4.5.** Tampak depan model fisik (a), Tampak geladak (b) dan *Fairlead* model (c).



**Gambar 4.6.** Pemberat dan ulir di dalam lambung model fisik.

Langkah-langkah yang dilakukan untuk mendapatkan distribusi massa yang diinginkan adalah sebagai berikut:

1. Menghitung massa total yang digunakan material model.



Setiap material model yang dipakai ditimbang untuk mendapatkan massa total dari struktur. Pengukuran dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah, hasil pengukuran didapat pada Tabel 4.4.

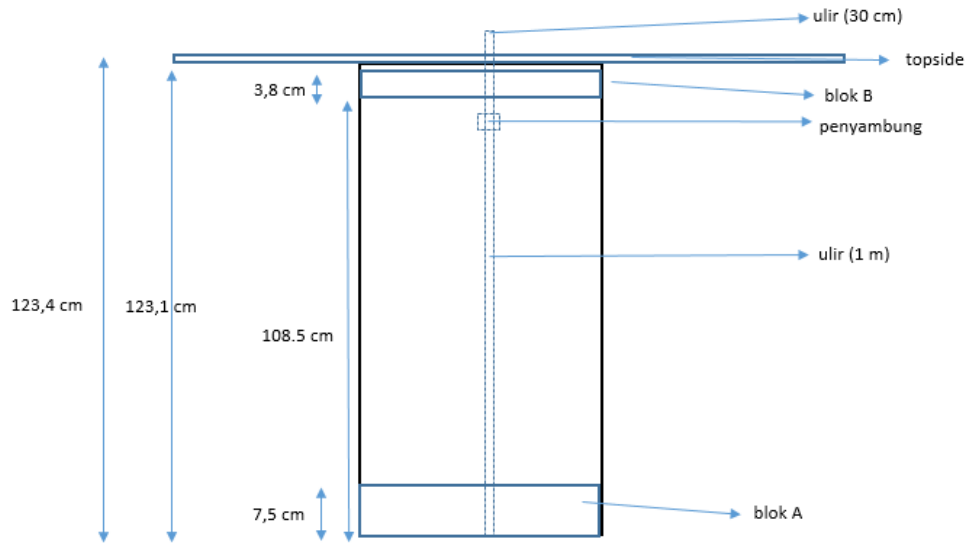
**Tabel 4.4.** Hasil pengukuran berat material.

Bagian		Tebal (cm)	Berat (g)	Jumlah	Total (g)
<b>Blok A</b>	Ballast 1	2	1628.49	1	1628.49
	Ballast 2	2	1623.09	1	1623.09
	Ballast 3	2.5	2094.09	1	2094.09
	Ballast 4	1	663.59	1	663.59
	Cap	0.3	47.46	1	47.46
<b>Blok B</b>	Ballast 5	2.5	2096.69	1	2096.69
	Ballast 6	0.8	466.00	1	466.00
	Ballast 7	0.5	179.49	1	179.49
<b>Topside</b>		0.3	599.50	1	599.50
<b>Tambahan</b>	Ulir (130 cm)		352.09	1	352.09
	Pipa	-	4087.53	1	4087.53
	Penyambung	-		1	0
	Mur	-		2	0
<b>Total</b>					13898.01

## 2. Distribusi beban untuk pemenuhan jari-jari girasi

Setiap material yang dipakai dihitung momen inersia massanya. Momen inersia massa masing-masing material kemudian digabungkan untuk dicari momen inersia massa total. Momen inersia massa total yang didapat akan dihitung menjadi jari-jari girasi model fisik.

Momen inersia massa dari material tergantung pada masa benda dan bentuk material. Untuk mempermudah perhitungan, model dibagi menjadi beberapa bagian diantaranya pipa PVC, blok A, blok B, topside dan ulir.



**Gambar 4.7.** Desain pemberat dan ulir.

Perhitungan dari setiap blok adalah:

a. Pipa PVC (Silinder Berongga)

Persamaan 4.1 merupakan persamaan momen inersia massa dari silinder berongga relatif terhadap pusat massanya dengan  $I_{ox}$  merupakan momen inersia massa gerakan roll,  $I_{oy}$  merupakan momen inersia massa gerakan *pitch*,  $m$  merupakan masa benda,  $r$  merupakan jari-jari silinder dan  $l$  merupakan panjang silinder.

$$I_{ox} = I_{oy} = \frac{1}{12} m (6r^2 + l^2) \quad (4.1)$$

Pipa PVC mempunyai ukuran massa 4087.53 gr, diameter 12.8 cm dan panjang 123.4 cm. Kemudian didapatkan  $I_{ox} = I_{oy} = 5287070 \text{ gr.cm}^2$

b. Blok A (Lingkaran Pejal)

Blok A terdiri dari material-material yang berbentuk silinder pejal. Persamaan 4.2 digunakan untuk menghitung momen inersia massa dari silinder pejal relatif terhadap pusat massanya dengan  $I_{ox}$  merupakan momen inersia massa gerakan *roll*,  $I_{oy}$  merupakan momen inersia massa gerakan *pitch*,  $m$  merupakan masa benda,  $r$  merupakan jari-jari silinder dan  $l$  merupakan panjang silinder.

$$I_{ox} = I_{oy} = \frac{1}{12} m (3r^2 + l^2) \quad (4.2)$$

Blok A terdiri dari pemberat berbahan besi dan *cap* berbahan akrilik. Ukuran dan hasil perhitungan material-material di blok A terlampir di Tabel 4.5.

**Tabel 4.5.** Perhitungan momen inersia massa Blok A

Komponen	Berat (g)	$I_{ox}$ (g.cm <sup>2</sup> )	$I_{oy}$ (g.cm <sup>2</sup> )
<i>Ballast 1</i>	1628.49	16446.05	16446.05
<i>Ballast 2</i>	1623.09	16391.52	16391.52
<i>Ballast 3</i>	2094.09	20624.60	20624.60
<i>Ballast 4</i>	663.59	6825.99	6825.99
<i>Cap</i>	47.46	471.32	471.32

c. Blok B

Blok B terdiri dari material-material yang berbentuk silinder pejal, sehingga persamaan yang digunakan sama dengan perhitungan blok A (persamaan 4.2).

Blok B hanya terdiri dari pemberat berbahan besi. Ukuran dan hasil perhitungan material-material di blok B terlampir di Tabel 4.7.

**Tabel 4.6.** Perhitungan momen inersia massa Blok B.

Komponen	Berat (g)	$I_{ox}$ (g.cm <sup>2</sup> )	$I_{oy}$ (g.cm <sup>2</sup> )
<i>Ballast 5</i>	2096.7	20748.49	20748.49
<i>Ballast 6</i>	465.99	4556.90	4556.90
<i>Ballast 7</i>	179.49	1756.57	1756.57

d. Topside

*Topside* terdiri dari geladak berbahan akrilik. Bentuk dari geladak merupakan balok dengan panjang 40 cm, lebar 40 cm dan tebal 0.3 cm. Persamaan 4.3 digunakan untuk menghitung momen inersia massa dari topside relatif terhadap pusat massanya dengan  $I_{ox}$  merupakan momen inersia massa gerakan *roll*,  $I_{oy}$  merupakan momen inersia massa gerakan *pitch*,  $m$  merupakan masa benda,  $p$  merupakan panjang balok,  $l$  merupakan lebar balok dan  $t$  merupakan tebal balok.

$$I_{ox} = \frac{1}{12} m (l^2 + t^2) \quad (4.3a)$$

$$I_{oy} = \frac{1}{12} m (p^2 + t^2) \quad (4.3b)$$

Hasil perhitungan momen inersia massa dari *topside* dengan berat 599.5 gr yaitu  $I_{ox} = 79937.83 \text{ gr.cm}^2$  dan  $I_{oy} = 79937.83 \text{ gr.cm}^2$ .

e. Ulir

Pemberat akan dimasukkan ke dalam ulir. Ulir merupakan baut yang terbuat dari besi yang mempunyai panjang 1.3 m dengan diameter 8 mm. Karena berbentuk silinder pejal maka Persamaan 4.2 dipakai untuk menghitung momen inersia masa dari ulir. Momen inersia dari ulir dengan berat 352.09 gr yaitu  $I_{ox} = I_{oy} = 495873.99 \text{ gr.cm}^2$ .

Setelah momen inersia massa dari setiap material diketahui, perhitungan momen inersia massa total terhadap pusat masa dilakukan. Langkah pertama untuk mencari momen inersia total tersebut adalah dengan mencari pusat masa dari benda terlebih dahulu. Tabel 4.7 menunjukkan posisi material dengan sumbu 0 di x (centerline), y (midship) dan z (keel). Kemudian berdasarkan data dari tabel 4.7 didapatkan  $LCG = 0 \text{ cm}$ ,  $TCG = 0 \text{ cm}$ ,  $VCG = 49.01 \text{ cm}$

**Tabel 4.7.** Posisi pusat massa dari setiap material yang dipakai.

		<b>Berat (g)</b>	<b>LCG (cm)</b>	<b>TCG (cm)</b>	<b>VCG (cm)</b>
<b>Blok A</b>	<i>Cap</i>	47.46	0.00	0.00	0.15
	<b>Ballast 1</b>	1628.5	0.00	0.00	6.50
	<b>Ballast 2</b>	1623.1	0.00	0.00	4.50
	<b>Ballast 3</b>	2094.1	0.00	0.00	3.0
	<b>Ballast 4</b>	663.59	0.00	0.00	1.25
<b>Blok B</b>	<b>Ballast 5</b>	2096.7	0.00	0.00	109.75
	<b>Ballast 6</b>	465.99	0.00	0.00	111.40
	<b>Ballast 7</b>	179.49	0.00	0.00	112.05
<b>Tambahan</b>	<b>Topside</b>	599.50	0.00	0.00	123.55
	<b>Ulir (130 cm)</b>	352.09	0.00	0.00	65.30
<b>PVC</b>	<b>PVC</b>	4087.53	0.00	0.00	61.70
	<b>Total</b>	13838.01			

Setelah pusat massa dari model diketahui, momen inersia massa relatif terhadap pusat masa dapat dicari. Jari-jari girasi dapat dicari dengan momen inersia masa yang diketahui, sesuai dengan persamaan 4.4. Kemudian didapatkan jari-jari girasi  $R_{xx} = R_{yy} = 48.47 \text{ cm}$ .

$$Jari - jari\ girasi = \sqrt{\frac{Inersia\ massa\ total\ gerak\ yang\ ditinjau}{massa\ total\ model}} \quad (4.4)$$

Setelah model dibuat, nilai-nilai target pusat massa dan jari-jari girasi yang telah didapatkan perlu divalidasi pada model yang sudah jadi. Tabel 4.8 di bawah ini merupakan perbandingan dari distribusi massa hasil skala dengan nilai target hasil perhitungan.

**Tabel 4.8.** Perbandingan distribusi massa hasil skala dengan hasil perhitungan.

Deskripsi	Model Fisik		Hasil Perhitungan		Error (%)
	Besaran	Satuan	Besaran	Satuan	
Massa Total	13.58	kg	13.838	kg	1.89 %
<i>Keel to Gravity</i> (KG)	49.6	cm	49.01	cm	1.19%
Jari-jari girasi gerak <i>pitch</i>	49.2	cm	48.47	cm	1.48%
Jari-jari girasi gerak <i>roll</i>	49.2	cm	48.47	cm	1.48%

## 4.2. PEMODELAN TALI TAMBAT

Tali tambat yang digunakan dalam studi eksperimen ini mengacu pada tali tambat pada katalog dari Balmoral Marine (2010) yang berisi properties *mooring equipment* seperti jangkar, rantai, *wire rope* dan lain-lain yang digunakan dalam industri lepas pantai. Pada studi eksperimen ini, data tali tambat yang dijadikan acuan adalah tali *wire rope* dengan data kekakuan.

Dari data di Gambar 4.8, properties *wire rope* yang digunakan adalah *wire rope* dengan kekakuan sebesar 1175 MN. Properties dari *wire rope* yang digunakan dijelaskan pada Tabel 4.9.

**Tabel 4.9.** Properti *mooring line wire rope*.

<b>Diameter</b>	115	mm
<b>Masa jenis (udara)</b>	65	kg/m
<b>Masa jenis (air)</b>	55	kg/m
<b>MBF</b>	11760	kN
<b>Kekakuan</b>	1175	MN

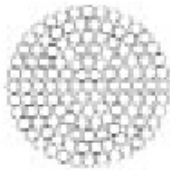
4.34

WIRE ROPE

ROPE SPECIFICATIONS

SPIRAL STRAND

- Designed to improve service life
- Surface finish: hot dip galvanised
- Sheathing: HDPE yellow colour with longitudinal dark stripe
- Tensile grades of wire optimised to improve wire ductility
- Rope, size, mass and MBF may be customised according to project design requirements
- Supply includes: Quality plan - Fatigue design calculations  
Wear design calculation - Corrosion design calculation



Wire rope dia		Mass (unsheathed)		Mass (sheathed)		Metallic Area mm²	MBF kN	Stiffness MN	Torque 25% MBF Nm	Turns 25% MBF
Uncoated mm	Sheathed mm	Air kg/m	Sea water kg/m	Air kg/m	Sea water kg/m					
77	91	29	25	32	25	3440	5480	525	750	0.5
83	99	34	29	37	29	4000	6370	610	950	0.5
89	105	39	33	42	33	4600	7330	700	1200	0.4
96	114	46	38	49	38	5350	8530	820	1500	0.4
102	122	51	43	55	43	6040	9360	925	1750	0.4
108	128	58	49	61	48	6770	10490	1035	2100	0.4
115	137	65	55	69	54	7680	11760	1175	2500	0.3
121	145	72	61	76	60	8500	12720	1300	2850	0.3
127	151	80	67	84	66	9370	13930	1435	3300	0.3
134	160	89	75	93	73	10430	15510	1595	3850	0.3
140	168	97	82	101	79	11390	16930	1740	4400	0.3
147	175	107	90	112	88	12550	18660	1920	5100	0.3

All dimensions are approximate

**Gambar 4.8.** Katalog properties *wire rope*.

Tali tambat yang sudah ditentukan kemudian diskala menjadi dimensi eksperimen. Bahan yang digunakan di sini adalah senar pancing, dapat dilihat pada Gambar 4.9, yang menggunakan bahan nilon, dengan properties yang dijelaskan pada Tabel 4.10.

**Tabel 4.10.** Spesifikasi tali tambat eksperimen.

Keterangan	Simbol	Model (tali nilon)	Satuan
Modulus elastisitas	E	2000000000	N/m <sup>2</sup>
Diameter tali	D	0,62	mm
Luas Tali	A	0,3019	mm <sup>2</sup>
Panjang Tali	L	1,8	m



**Gambar 4.9.** Bahan tali tambat.

Kemudian, penskalaan dilakukan kembali pada senar pancing sesuai dengan skala model untuk mendapatkan spesifikasi tali tambat yang digunakan pada model fisik. Skala model yang digunakan adalah 1:125, maka dari hasil skala didapatkan properties tali tambat model fisik dijelaskan pada Tabel 4.11.

**Tabel 4.11.** Spesifikasi tali tambat pada *prototype*.

Keterangan	Simbol	Model (tali pancing)	Satuan
Modulus elastisitas	E	250000000000	N/m <sup>2</sup>
Diameter tali	D	77,50	mm
Luas Tali	A	4717,30	mm <sup>2</sup>
Panjang Tali	L	225	m

Dari tabel 4.11 di atas, kekakuan tali dapat dihitung dengan Persamaan 4.5.

$$\begin{aligned}
 K &= E \times A \\
 K &= 250.000 \text{ MN/m}^2 \times 0,00472 \text{ m}^2 \\
 K &= 1.179,32 \text{ MN}
 \end{aligned}
 \tag{4.5}$$

Validasi dilakukan dengan membandingkan kekakuan *wire rope* yang ada pada katalog Balmoral Marine (2010) dengan senar. Setelah dibandingkan antara *stiffness* model asli yaitu 1179,32 MN dengan *stiffness wire rope* acuan yaitu 1175 MN didapatkan error sebesar 0,37%. Hal tersebut menunjukkan bahwa tali yang digunakan dalam eksperimen memenuhi syarat dari validasi ( $\text{error} < 5\%$ ). Sehingga untuk analisa eksperimen, numerik dan analitis data properties tali tambat ditunjukkan pada Tabel 4.12.

**Tabel 4.12.** Data properties tali tambat yang digunakan pada model fisik

	Model fisik	Full Scale	Satuan
Length	1,8	225	m
Diameter	0,62	115	mm
Axial Stiffness (EA)	603,814	1,175,000,000	N
MBF	222,41	11,760,000	N

### 4.3. VALIDASI MODEL

#### 4.3.1. Validasi Model Numerik

Model yang dibuat di MOSES dapat dilihat parameter hidrostatiknya dan distribusi massanya. Parameter ini yang akan digunakan untuk memvalidasi model fisik, sehingga bisa dilakukan analisa. Pada penelitian ini batas maksimum error yang diijinkan adalah 5 %. Tabel 4.19 menampilkan perbandingan antara model numerik dan data. Berdasar Tabel 4.19 maka model numerik yang dibuat di MOSES bisa dilanjutkan untuk analisa gerak dan tali tambat.

**Tabel 4.13a.** Perbandingan dan validasi model numerik dengan data

	Prototype		Model Numerik		Error (%)
Diameter	16.00	m	16.00	m	0.00
Draft	135.03	m	135.03	m	0.00
Length	154.23	m	154.23	m	0.00
Fairlead depth	12.74	m	12.74	m	0.00
Weight	26531524.91	kg	27117650	kg	2.21
KG	62.03	m	62.03	m	0.00
Roll Gyrasi	61.48	m	61.48	m	0.00
Pitch Gyrasi	61.48	m	61.48	m	0.00



**Tabel 4.13b.** Perbandingan dan validasi model numerik dengan data (lanjutan)

	Prototype		Model Numerik		Error (%)
<b>Mooring Diameter</b>			115	mm	
<b>Draft</b>	135.03	m	135.03	m	0.00

#### 4.3.2. Validasi Model Eksperimen

Setelah melakukan proses perencanaan, model fisik yang sudah dibuat dilakukan validasi. Validasi diperlukan karena pada pembuatan, selain material utama yang dipakai, pada model juga terdapat material pendukung seperti lem, dempul, resin dan sebagainya. Proses ini dilakukan sebagai berikut:

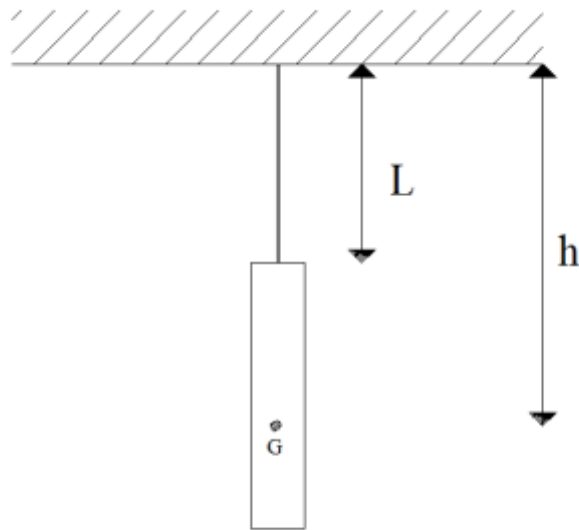
##### 1. Massa Total

Perhitungan massa total dilakukan dengan melihat sarat yang dimiliki struktur ketika keadaan terapung. Berdasar pengamatan yang didapat sarat model fisik yaitu 108.5 cm.

Dengan sarat dan diameter lambung yang diketahui, maka berat model dapat dihitung sebagai perkalian antara volume tercelup dan massa jenis air, sehingga didapat displacement model yaitu 13.90 kg.

##### 2. Jarak KG dan Jari-jari Girasi

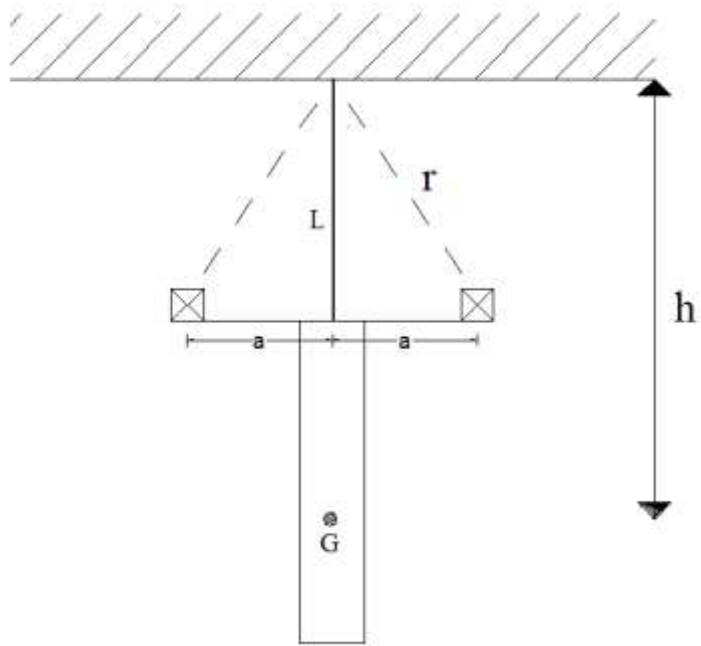
Jarak KG dan jari-jari girasi pada struktur dihitung dengan melakukan tes pendulum pada struktur. Tes pendulum merupakan tes mengayunkan model dan menghitung periode dari ayunan struktur. Tes dilakukan dengan dua kondisi, kondisi 1 merupakan kondisi model tanpa massa tambahan, sedangkan kondisi 2 merupakan kondisi model dan pemberat pada jarak tertentu. Pemberat yang dipakai merupakan plastisin yang telah dihitung beratnya di Laboratorium Mekanika Tanah Teknik Kelautan. Pada setiap kondisi dicatat periode ayunannya. Periode yang didapat kemudian digunakan untuk mencari KG dan jari-jari girasi. Skenario tes pendulum untuk kondisi 1 dan kondisi 2 dapat dilihat pada Gambar 4.10 dan Gambar 4.11. Ukuran-ukuran yang dipakai untuk tes pendulum terdapat pada tabel 4.14 berikut ini.



**Gambar 4.10.** Skenario tes pendulum kondisi 1 untuk perhitungan jari-jari girasi.



**Gambar 4.11.** Tes pendulum kondisi 1.



**Gambar 4.12.** Skenario tes pendulum kondisi 2 untuk perhitungan jari-jari girasi.



**Gambar 4.13.** Tes pendulum kondisi 2.

**Tabel 4.14.** Ukuran – ukuran yang digunakan pada pendulum test

1.	Berat Model (m)	13.90	kg
2.	Percepatan gravitasi (g)	9.81	m/s <sup>2</sup>
3.	Jarak massa tambah (a)	0.153	m (dari titik pusat model)
4.	Berat massa tambah (m)	1.52	kg
5.	Panjang tali (L)	2.36	m
6.	Panjang tali terhadap jarak massa tambah (r)	2.37	m

Tes pendulum dilakukan sebanyak 50 kali. Rata-rata periode yang didapat ditampilkan dalam Tabel 4.15.

**Tabel 4.15.** Periode dan frekuensi gerak pendulum model fisik kondisi 1 dan 2

1.	Periode gerak tanpa massa tambah (To)	3.502	detik
2.	Periode gerak dengan masa tambah (T <sub>1</sub> )	3.540	detik
3.	Frekuensi tanpa massa tambah ( $\omega_0$ )	1.794	rad/s
4.	Frekuensi dengan massa tambah ( $\omega_1$ )	1.775	rad/s

Dari data-data pada Tabel 4.15 dapat ditentukan jarak dari titik tumpuan tali ke titik berat model (h) dengan menggunakan persamaan 4.7.

$$h = \frac{2m(r^2\omega_1^2 - Lg)}{\left[1 - \left(\frac{\omega_1}{\omega_0}\right)^2\right]Mg} \quad (4.7)$$

$$h = 2.964 \text{ m}$$

Dari hasil perhitungan diatas, dapat diketahui titik berat model adalah sebagai berikut :

$$KG = h - l - \text{panjang ulir sisa} - \text{tali pengait di ulir}$$

$$KG = 296.4 - 236 - (130-123.4) - 3.8$$

$$KG = 50.25 \text{ cm dari keel}$$

Dari hasil perhitungan di atas, dapat ditentukan momen inersia massa gerak *pitch* dan *roll* model fisik terhadap titik gantung dengan persamaan 4.8.

$$I_{44} = I_{55} = \frac{mgh}{\omega_o^2} \quad (4.8)$$

$$I_{44} = I_{55} = \mathbf{125.58 \text{ kg.m}^2}$$

Kemudian dapat ditentukan momen inersia massa gerak *pitch* dan *roll* model relatif terhadap titik berat dengan Persamaan 4.9.

$$I_m = I - mh^2 \quad (4.9)$$

$$I_m = \mathbf{3.47 \text{ kgm}^2}$$

Nilai momen inersia yang diketahui dapat digunakan untuk mencari jari-jari girasi sesuai dengan Persamaan 4.10.

$$\text{Radius girasi} = \sqrt{\frac{I_m}{m}} \quad (4.10)$$

$$\mathbf{\text{Radius girasi} = 0.4993 \text{ m}}$$

Karena massa terdistribusi merata relatif terhadap sumbu z, maka radius girasi *pitch* dan *roll* adalah identik dengan nilai 49.962 cm.

Tabel 4.16 menunjukkan perbandingan parameter model antara *prototype*, target dan model fisik. Model fisik valid apabila error yang terukur kurang dari 5%.

**Tabel 4.16.** Validasi model fisik.

	Data		Konversi	Target		Achieved		Error
Diameter	16.00	m	125	12.80	cm	12.80	cm	0.0%
Draft	135.03	m	125	108.00	cm	108.00	cm	0.0%
Length	154.23	m	125	123.4	cm	123.40	cm	0.0%
Fairlead Depth	12.74	m	125	10.2	cm	10.20	cm	0.0%
Weight	26531524.91	kg	1953125	13.58	kg	13.90	kg	2.35%
KG	62.03	m	125	49.6	cm	50.25	cm	1.31%
Roll Gyrase	61.48	m	125	49.2	cm	49.93	cm	1.48%
Pitch Girasi	61.48	m	125	49.2	cm	49.93	cm	1.48%
Mooring								
Diameter	-					0.62	mm	-
EA (Stiffness)						1175	MN	-

#### 4.4. INSTRUMEN PENGUKURAN

Pada studi eksperimen diperlukan instrumen untuk mengukur gerak dan tegangan tali dari model fisik. Pengukuran gerak menggunakan *gyroscope* dan *image processing*, sedangkan pengukuran tegangan tali menggunakan instrumen *loadcell*. Sebelum dilakukan pengukuran, ketiga instrumen ini perlu dilakukan kalibrasi.

##### 4.4.1. Kalibrasi Gyroscope

Gerak rotasional sumbu y (*pitch*) dari model SPAR diukur menggunakan *gyroscope*. Instrumen *gyroscope* yang digunakan adalah *gyroscope* MPU 6050 GY87. Instrumen ini mampu mengukur sudut yang dibentuk oleh MPU 6050. Pada MPU 6050 terdapat sumbu orientasi x, y dan z sebagai orientasi nilai yang dihasilkan keluaran dari MPU 6050. Tegangan yang sudah diamplifikasi akan diterima oleh *microcontroller* Arduino UNO untuk kemudian ditransfer ke laptop dalam angka-angka digital.

Instrumen *gyroscope* (Gambar 4.14) diletakkan pada bagian geladak (Gambar 4.15) pada model fisik yang berbentuk persegi dengan bahan akrilik.



**Gambar 4.14.** Instrumen *gyroscope*.



**Gambar 4.15** geladak dan busur.

Gerakan *pitch* dari SPAR diukur dengan menggunakan *gyroscope*. Untuk program pembacaan *gyroscope* menggunakan *library* yang tersedia di internet dengan modifikasi minor untuk *data logging* ke excel. Program ini menghasilkan keluaran berupa angka-angka dengan format sebagai berikut:

DATA, TIME, <WAKTU>, <YAW>, <FILTERED YAW>, <PITCH>, <FILTERED PITCH>, <ROLL>, <FILTERED ROLL>, <LC1>, <LC2>, <LC3>, <LC4>.

Kalibrasi *gyroscope* dilakukan untuk menyesuaikan nilai keluaran dari sensor dengan nilai sudut yang terjadi (Gambar 4.16). Angka yang perlu dilihat dari keluaran *gyroscope* adalah angka pada <FR> (*Filtered Roll*) (Gambar 4.17). Kalibrasi dilakukan dengan mengukur sudut 0°, 10°, 30°, 40°, 50°, dan 60° di atas meja dengan bantuan busur (Gambar 4.18). Proses

ini dilakukan dengan dua arah pengukuran yaitu searah dan berlawanan jarum jam relatif terhadap *gyroscope*.



**Gambar 4.16.** *Gyroscope* pada geladak model fisik.

```
COM4 (Arduino/Genuino Uno)

DATA, TIME, 89317, 49.20, 49.21, -1.85, -1.85, 0.6, 0.60, 0.00, 0.00, 0.02, 0.00
DATA, TIME, 89405, 49.20, 49.21, -1.85, -1.85, 0.6, 0.60, 0.00, 0.00, 0.02, 0.00
DATA, TIME, 89493, 49.20, 49.21, -1.85, -1.85, 0.6, 0.60, 0.00, 0.00, 0.03, 0.00
DATA, TIME, 89592, 49.19, 49.21, -1.85, -1.85, 0.6, 0.60, 0.00, 0.00, 0.02, 0.00
DATA, TIME, 89668, 49.19, 49.20, -1.85, -1.85, 0.6, 0.60, 0.00, 0.00, 0.02, 0.00
DATA, TIME, 89756, 49.19, 49.20, -1.85, -1.85, 0.6, 0.60, 0.00, 0.00, 0.03, 0.00
DATA, TIME, 89844, 49.19, 49.20, -1.85, -1.85, 0.6, 0.60, 0.00, 0.00, 0.03, 0.00
DATA, TIME, 89932, 49.19, 49.20, -1.85, -1.85, 0.6, 0.61, 0.00, 0.00, 0.03, 0.00
DATA, TIME, 90020, 49.19, 49.20, -1.85, -1.85, 0.6, 0.61, 0.00, 0.00, 0.03, 0.00
DATA, TIME, 90117, 49.20, 49.20, -1.84, -1.85, 0.6, 0.61, 0.00, 0.00, 0.03, 0.00
DATA, TIME, 90195, 49.20, 49.20, -1.85, -1.85, 0.5, 0.60, 0.00, 0.00, 0.03, 0.00
DATA, TIME, 90284, 49.20, 49.20, -1.85, -1.85, 0.5, 0.60, 0.00, 0.00, 0.03, 0.00
DATA, TIME, 90372, 49.20, 49.20, -1.85, -1.85, 0.5, 0.60, 0.00, 0.00, 0.03, 0.00
DATA, TIME, 90460, 49.20, 49.20, -1.85, -1.85, 0.5, 0.60, 0.00, 0.00, 0.03, 0.00
DATA, TIME, 90548, 49.20, 49.20, -1.85, -1.85, 0.5, 0.60, 0.00, 0.00, 0.03, 0.00
DATA, TIME, 90642, 49.19, 49.20, -1.85, -1.85, 0.6, 0.60, 0.00, 0.00, 0.03, 0.00
DATA, TIME, 90723, 49.19, 49.20, -1.85, -1.85, 0.6, 0.60, 0.00, 0.00, 0.03, 0.00
DATA, TIME, 90811, 49.19, 49.20, -1.85, -1.85, 0.6, 0.60, 0.00, 0.00, 0.03, 0.00
DATA, TIME, 90899, 49.19, 49.20, -1.85, -1.85, 0.6, 0.60, 0.00, 0.00, 0.03, 0.00
DATA, TIME, 90987, 49.19, 49.20, -1.85, -1.85, 0.6, 0.60, 0.00, 0.00, 0.03, 0.00
DATA, TIME, 91074, 49.19, 49.20, -1.85, -1.85, 0.6, 0.60, 0.00, 0.00, 0.03, 0.00
DATA, TIME, 91166, 49.18, 49.20, -1.85, -1.85, 0.6, 0.60, 0.00, 0.00, 0.03, 0.00
DATA, TIME, 91250, 49.18, 49.19, -1.85, -1.85, 0.6, 0.60, 0.00, 0.00, 0.03, 0.00
DATA, TIME, 91338, 49.19, 49.19, -1.85, -1.85, 0.6, 0.60, 0.00, 0.00, 0.02, 0.00
DATA, TIME, 91426, 49.19, 49.19, -1.85, -1.85, 0.6, 0.60, 0.00, 0.00, 0.02, 0.00
DATA, TIME, 91514, 49.18, 49.19, -1.85, -1.85, 0.6, 0.60, 0.00, 0.00, 0.02, 0.00
DATA, TIME, 91617, 49.18, 49.19, -1.84, -1.85, 0.6, 0.60, 0.00, 0.00, 0.02, 0.00
DATA, TIME, 91689, 49.18, 49.19, -1.84, -1.85, 0.6, 0.60, 0.00, 0.00, 0.02, 0.00
DATA, TIME, 91778, 49.18, 49.19, -1.84, -1.85, 0.6, 0.60, 0.00, 0.00, 0.02, 0.00
DATA, TIME, 91866, 49.18, 49.19, -1.84, -1.85, 0.6, 0.60, 0.00, 0.00, 0.02, 0.00
DATA, TIME, 91954, 49.18, 49.19, -1.85, -1.85, 0.6, 0.60, 0.00, 0.00, 0.02, 0.00
DATA, TIME, 92042, 49.18, 49.19, -1.85, -1.85, 0.6, 0.60, 0.00, 0.00, 0.02, 0.00
DATA, TIME, 92141, 49.18, 49.19, -1.84, -1.85, 0.6, 0.60, 0.00, 0.00, 0.02, 0.00
DATA, TIME, 92217, 49.18, 49.19, -1.84, -1.85, 0.6, 0.61, 0.00, 0.00, 0.02, 0.00
DATA, TIME, 92305, 49.18, 49.19, -1.84, -1.85, 0.6, 0.61, 0.00, 0.00, 0.02, 0.00
DATA, TIME, 92393, 49.18, 49.19, -1.84, -1.85, 0.6, 0.61, 0.00, 0.00, 0.02, 0.00
DATA, TIME, 92481, 49.18, 49.19, -1.84, -1.85, 0.6, 0.61, 0.00, 0.00, 0.02, 0.00
DATA, TIME, 92568, 49.18, 49.19, -1.84, -1.85, 0.6, 0.61, 0.00, 0.00, 0.02, 0.00
```

**Gambar 4.17.** Keluaran Arduino pada sudut 0° searah jarum jam.





**Gambar 4.18.** *Gyroscope* dan geladak saat proses kalibrasi.

Tabel 4.17 menunjukkan sudut yang dibuat dengan hasil keluaran *gyroscope* saat *gyroscope* diputar searah jarum jam. Tabel 4.18 menunjukkan sudut yang dibuat dengan hasil keluaran *gyroscope* diputar berlawanan arah jarum jam.

**Tabel 4.17.** Kalibrasi searah jarum jam.

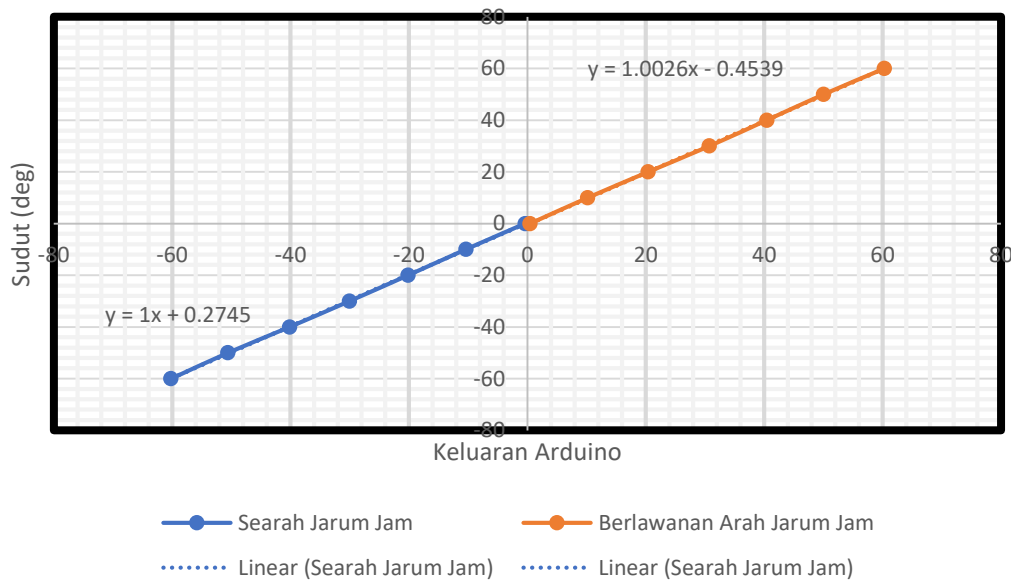
Sudut (deg)	Keluaran Gyroscope (satuan)
0°	-0.37
10°	-10.38
20°	-20.14
30°	-30.05
40°	-40.18
50°	-50.61
60°	-60.20

**Tabel 4.18.** Kalibrasi berlawanan jarum jam.

<b>Sudut (deg)</b>	<b>Output Giro (satuan)</b>
0°	0.60
10°	10.20
20°	20.42
30°	30.75
40°	40.44
50°	50.05
60°	60.30

Tabel 4.17 dan Tabel 4.18 dapat dibuat grafik seperti Gambar 4.19. Berdasarkan hasil kalibrasi *gyroscope* yang dilakukan, keluaran yang dihasilkan oleh Arduino mempunyai persamaan sesuai Tabel 4.19. Hal ini menunjukkan keluaran yang dikeluarkan merupakan sudut yang dibentuk dengan nilai positif menunjukkan berlawanan jarum jam dan negatif searah jarum jam. Kalibrasi dilakukan antara sudut 0° hingga 60° searah dan berlawanan arah jarum jam karena gerakan SPAR diasumsikan tidak akan bergerak *pitch* lebih dari 60°. Selain itu, validasi dilakukan dengan interval sudut sebesar 10° sehingga dapat diketahui apakah sensor dapat membaca mendekati hasil sebenarnya. Keluaran yang dihasilkan memiliki hubungan secara linier yang dapat disimpulkan bahwa sensor terkalibrasi untuk digunakan pada studi eksperimen kali ini.

## KELUARAN ARDUINO DAN SUDUT YANG DIBENTUK



**Gambar 4.19.** Keluaran Arduino dengan sudut yang dibentuk.

**Tabel 4.19.** Persamaan *trendline* Arduino.

Searah Jarum Jam	$y=1.00x-0.45$
Berlawanan Arah Jarum Jam	$y=1.00x+0.27$

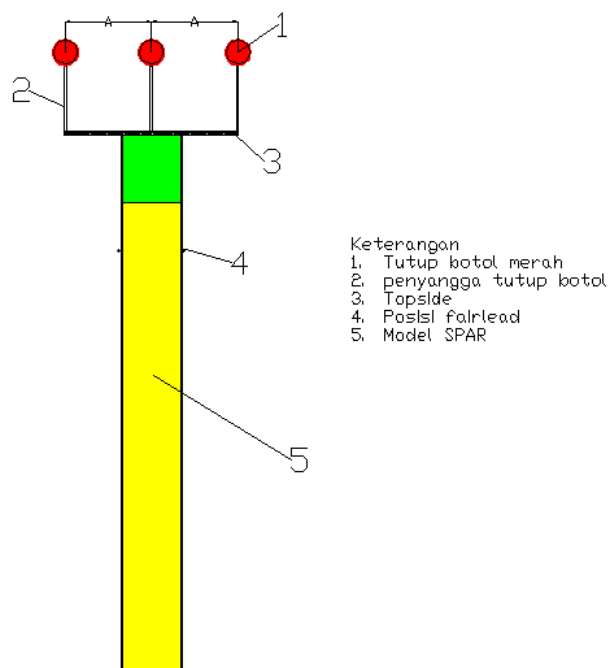
### 4.4.2. Kalibrasi Image Processing

*Digital image processing* adalah proses pengolahan gambar dua dimensi oleh perangkat komputer. *Digital image processing* merupakan proses pengambilan atribut-atribut pada gambar. Pada penelitian ini, *Digital image Processing* dimanfaatkan untuk pendeteksian objek pada video yang digunakan untuk merekam gerakan translasi naik-turun (*heave*) dan kanan-kiri (*surge*) yang terjadi pada objek berupa model SPAR yang mengapung di dalam air dan terkena gelombang dengan variasi periode gelombang.

Dalam proses representasi dan pemodelan, kuantitas dan karakter dari *pixel* menggambarkan suatu objek. *Pixel* merupakan satuan titik kecil yang menyusun sebuah gambar. Setiap *pixel* pada gambar menyimpan informasi warna. Banyaknya *pixel* yang menyusun suatu gambar tergantung pada resolusi gambar.

Pada penelitian ini, dipasang tiga buah bola berwarna merah pada model fisik yang terapung di air yang digunakan untuk merekam gerak pada objek.

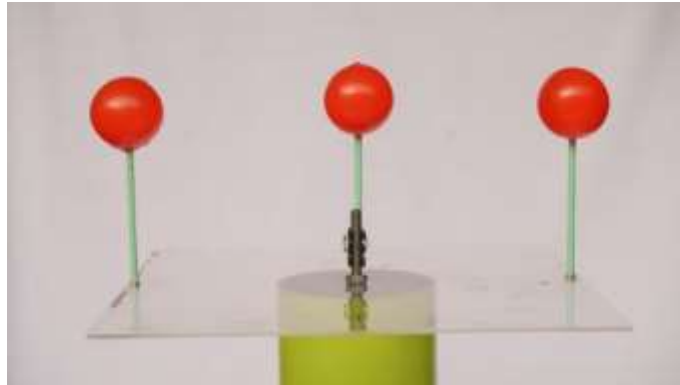
Warna merah dipilih untuk mendapatkan kontras warna pada gambar yang direkam. Selain itu bentuk lingkaran juga lebih mudah dibedakan oleh program. Objek yang ditinjau adalah bola yang berada di titik pusat model sedangkan bola yang diletakkan di ujung model digunakan untuk perhitungan skala *pixel* dan validasi data yang dihasilkan. Proses *image processing* ini dilakukan dengan menggunakan satu buah kamera webcam logitech c270 yang merekam gambar kemudian diolah menggunakan bantuan perangkat lunak visual basic C++.



**Gambar 4.20.** Sketsa model fisik dalam *Image Processing*.



**Gambar 4.21.** Kamera dan bola yang ditinjau.



**Gambar 4.22.** Konfigurasi geladak dengan objek yang ditinjau.

Langkah-langkah yang digunakan dalam menganalisa *image processing* ini adalah sebagai berikut:

#### 1. *Input Video*

*Input video* dilakukan dengan menggunakan kamera *real time* yang menggunakan lensa *fixed focus*. Kamera yang digunakan adalah webcam logitech c270 dengan kualitas gambar 3 MP dan *high definition video* HD 720p.



**Gambar 4.23.** Webcam Logitech c270 dengan lensa *fixed focus*.

#### 2. Pemisahan *Frame*

Langkah selanjutnya, perlu dilakukan konversi dari data *input video real time* yang direkam menjadi kumpulan data *frame* menggunakan bantuan perangkat lunak *visual basic C++* dengan sistem operasi berbasis Linux. Kombinasi dari data-data *frame* dinamakan video. Setiap video

mempunyai banyak jumlah *frame*, data ini nantinya yang akan diambil dan diolah untuk analisa gerakan pada model.

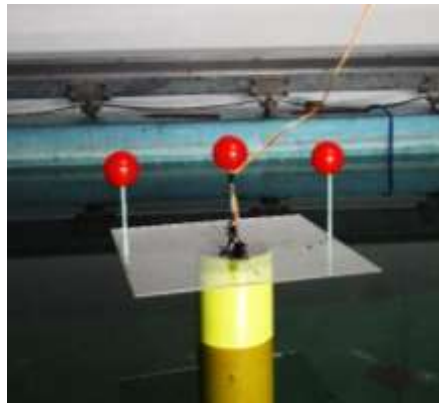
3. *Current image* dan *background image*

Setelah mengkonversi video menjadi data *frame*, Gambar *frame* pertama yang dihasilkan dinamakan *background image* sedangkan untuk gambar selain gambar pertama dinamakan *current images*.

4. *Background subtraction*

*Background subtraction* artinya pada tahap ini dilakukan pengurangan dari *current image* dan *background image*. *Current image* diperbarui setiap waktu perekaman sedangkan untuk *background image* tetap konstan menggunakan gambar pada *frame* awal. Dengan menggunakan teknik ini dapat diketahui besar perpindahan objek.

Gambar 4.24 merupakan contoh uji *image processing* yang dilakukan untuk merekam gerakan. Warna merah akan ditangkap oleh sistem *image processing* seperti pada Gambar 4.25. Keluaran dari gerakan yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 4.26 dan 4.27.

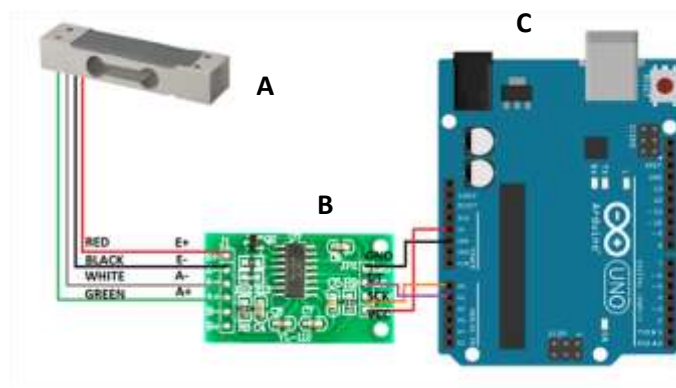


**Gambar 4.24.** Model fisik dengan bola merah yang digunakan dalam analisa gerak model menggunakan *image processing*.



#### 4.4.3. Kalibrasi *Load Cell*

Tegangan tali diukur menggunakan instrumen *Load Cell*. Instrumen ini memanfaatkan *strain-gauge* yang terpasang pada *load cell*. Jika *load cell* mengalami tarikan maka *strain-gauge* akan mengalami perubahan bentuk. Perubahan bentuk ini akan menghasilkan perubahan tegangan. Tegangan ini kemudian diamplifikasi menggunakan modul elektronik HX711 agar dapat terbaca. Tegangan yang sudah diamplifikasi akan diterima oleh *microcontroller* Arduino UNO untuk kemudian ditransfer ke laptop dalam bentuk angka-angka digital.



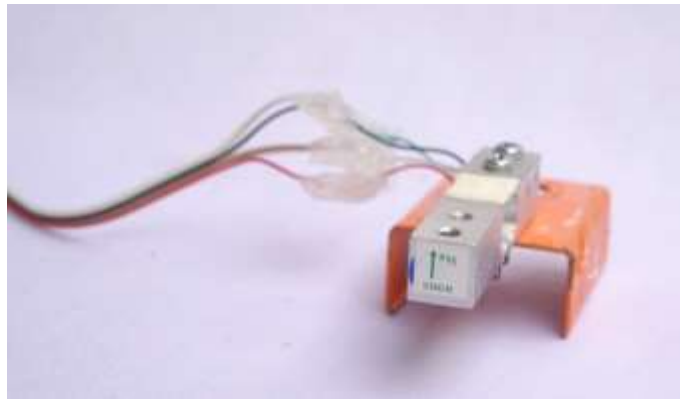
**Gambar 4.28.** Konfigurasi *Load Cell* (A), HX711 (B) dan Arduino UNO (C)  
(Layad Circuit, 2010)

Pada studi eksperimen, 4 *load cell* digunakan untuk mengukur tegangan tali dari 4 tali tambat, sehingga diperlukan 4 HX711 (*amplifier*) dan 4 *channel* dari 1 Arduino UNO. Arduino merupakan *platform open source* sehingga program dapat diunduh dengan mudah. Untuk pembacaan *load cell* digunakan program milik Jeff Rowberg (2012) dengan modifikasi minor untuk *data logging* ke excel. Program ini akan menampilkan angka-angka dengan format sebagai berikut:

DATA, TIME, <WAKTU>, <YAW>, <COMPUTED YAW>, <PITCH>,  
<COMPUTED PITCH>, <ROLL>, <COMPUTED ROLL>, <LC1>, <LC2>,  
<LC3>, <LC4>



Instrumen *load cell* yang digunakan pada studi eksperimen ini adalah *load cell* dengan kapasitas beban maksimum 5kg. *Load Cell* akan berfungsi jika beban mempunyai arah sesuai arah kerja *load cell* (Gambar 4.29). Eksperimen ini menggunakan 4 buah *load cell* (Gambar 4.30).



**Gambar 4.29.** Instrumen *Load Cell* dan arah beban.

Untuk keperluan kalibrasi *Load Cell*, angka yang perlu dilihat adalah angka pada kolom <LC1> (*Load Cell 1*), <LC2> (*Load Cell 2*), <LC3> (*Load Cell 3*), dan <LC4> (*Load Cell 4*). Angka digital yang ditampilkan oleh laptop perlu dikalibrasi sehingga dapat diketahui nilai yang sesungguhnya. Kalibrasi dilakukan dengan menimbang beberapa beban terukur sehingga dapat dicari regresi linear dari nilai-nilai yang keluar. Pada kalibrasi ini digunakan 5 buah beban, 1000 gram, 500 gram, 200 gram, 100 gram dan 50 gram (Gambar 4.31). Beban yang digunakan untuk pengukuran merupakan besi timbangan yang ada dipasaran. Besi timbangan juga sudah diukur ulang di Laboratorium Mekanika Tanah menggunakan timbangan elektronik dan menunjukkan nilai  $\pm 1$  gram.



**Gambar 4.30.** Keempat *Load Cell* yang digunakan.

Besi timbangan ditali dan digantungkan di sisi pengukuran *load cell*. Pada layar akan terlihat keluaran angka. Kemudian, setelah diberikan beban, angka yang muncul tersebut diolah untuk dicari regresi linear kalibrasi *load cell*. Setiap *load cell* akan diuji 2 kali untuk menemukan persamaan regresi linear dari setiap *load cell*.



**Gambar 4.31.** Beban Kalibrasi 1000 g (A), 500 g (B), 200 g (C), 100 g (D) dan 50 g (E).

Data yang ditunjukkan dari proses kalibrasi dengan 5 timbangan pada setiap *load cell* dengan 2 percobaan yang berbeda.

- *Load Cell 1*

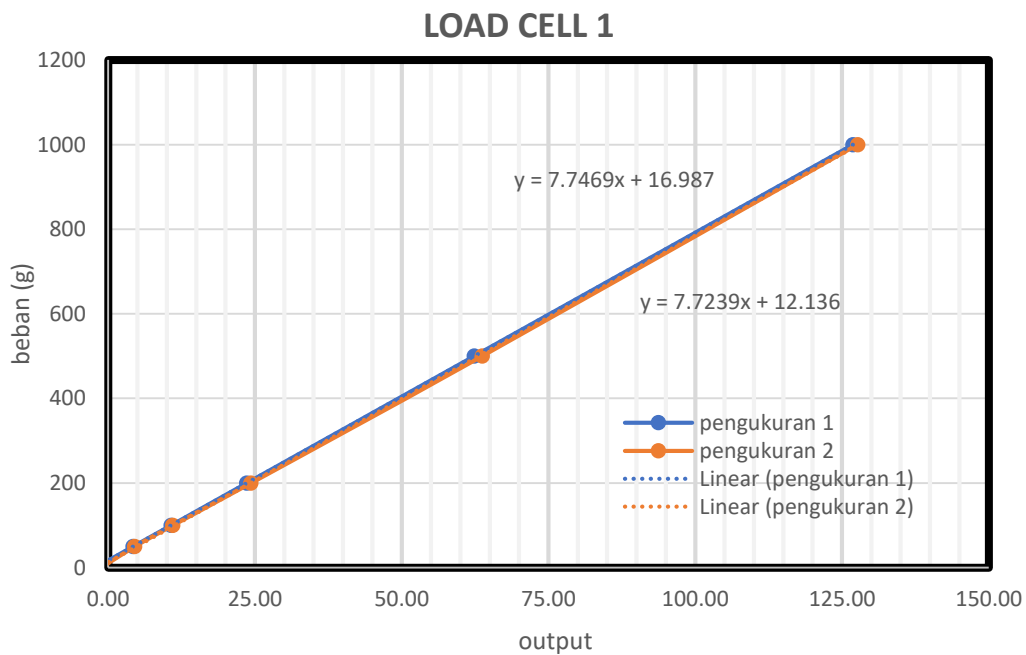
**Tabel 4.20.** Data kalibrasi *load cell* 1 percobaan 1.

Beban (g)	Output ( $\circ$ )
1000	126.9
500	62.4
200	23.6
100	10.7
50	4.3
0	0

**Tabel 4.21.** Data kalibrasi *load cell* 1 percobaan 2.

Beban (g)	Output ( $\circ$ )
1000	127.7
500	63.7
200	24.3
100	11.0
50	4.5
0	0

Data pada tabel 4.20 dan tabel 4.21 kemudian di-plot menjadi Gambar 4.32. Gambar 4.32 menunjukkan *Load Cell* 1 mempunyai persamaan linier, sehingga bisa digunakan dengan koreksi berdasar persamaan regresi linearnya.



**Gambar 4.32.** Grafik kalibrasi *Load Cell* 1.

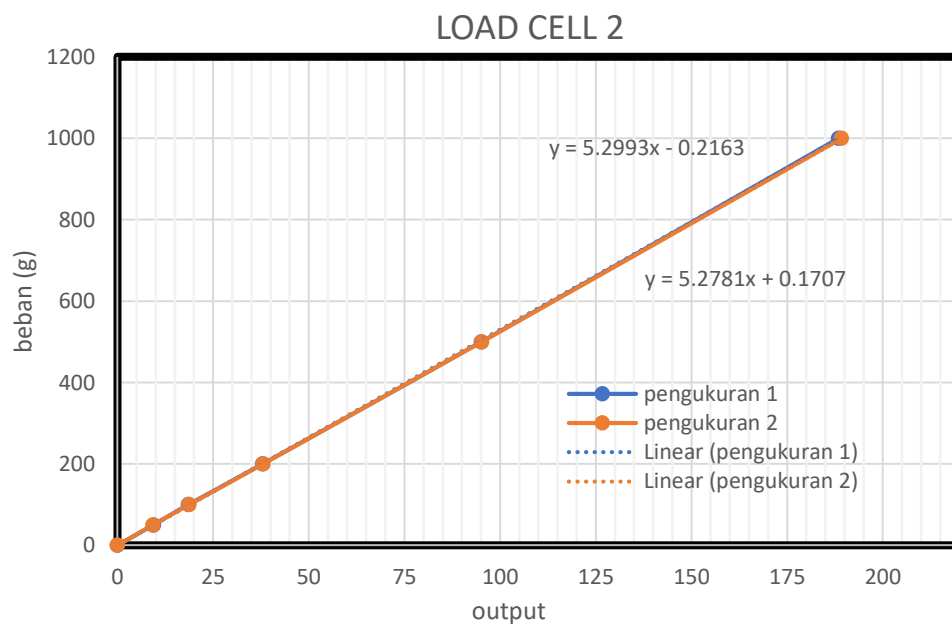
- *Load Cell 2*

**Tabel 4.22.** Data kalibrasi *load cell 2* percobaan 1.

Beban (g)	Output (V)
1000	188.4
500	95.1
200	37.95
100	18.5
50	9.4
0	0

**Tabel 4.23.** Data kalibrasi *load cell 2* percobaan 2.

Beban (g)	Output (V)
1000	189.2
500	95.15
200	38.02
100	18.72
50	9.22
0	0



**Gambar 4.33.** Grafik kalibrasi *Load Cell 2*.

Data pada Tabel 4.22 dan Tabel 4.23 kemudian di-*plot* menjadi Gambar 4.33. Gambar 4.33 menunjukkan Load Cell 2 mempunyai persamaan linier sehingga bisa digunakan dengan koreksi berdasar persamaan regresi linearnya.

- Load Cell 3

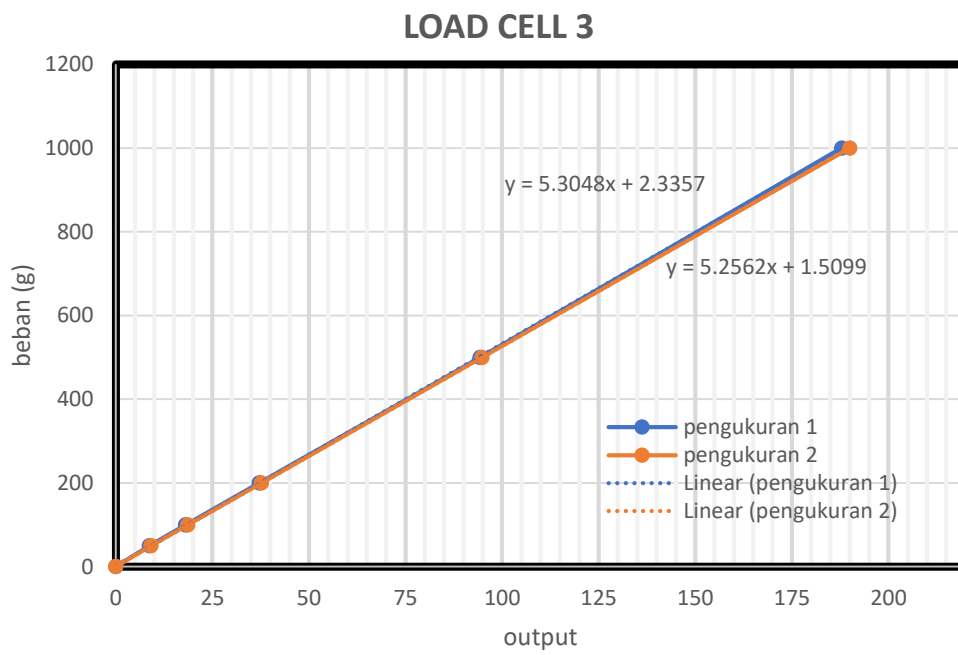
**Tabel 4.24.** Data kalibrasi *load cell* 3 percobaan 1.

Beban (g)	Output ( $\Omega$ )
1000	187.9
500	94.3
200	37.1
100	18.1
50	8.7
0	0

**Tabel 4.25.** Data kalibrasi *load cell* 3 percobaan 2.

Beban (g)	Output ( $\Omega$ )
1000	190.0
500	94.8
200	37.7
100	18.6
50	9.1
0	0

Data pada Tabel 4.24 dan Tabel 4.25 kemudian di-*plot* menjadi Gambar 4.34. Gambar 4.34 menunjukkan *Load Cell* 3 mempunyai persamaan linier sehingga bisa digunakan dengan koreksi berdasar persamaan regresi linearnya.



**Gambar 4.34.** Grafik kalibrasi *Load Cell 3*.

- *Load Cell 4*

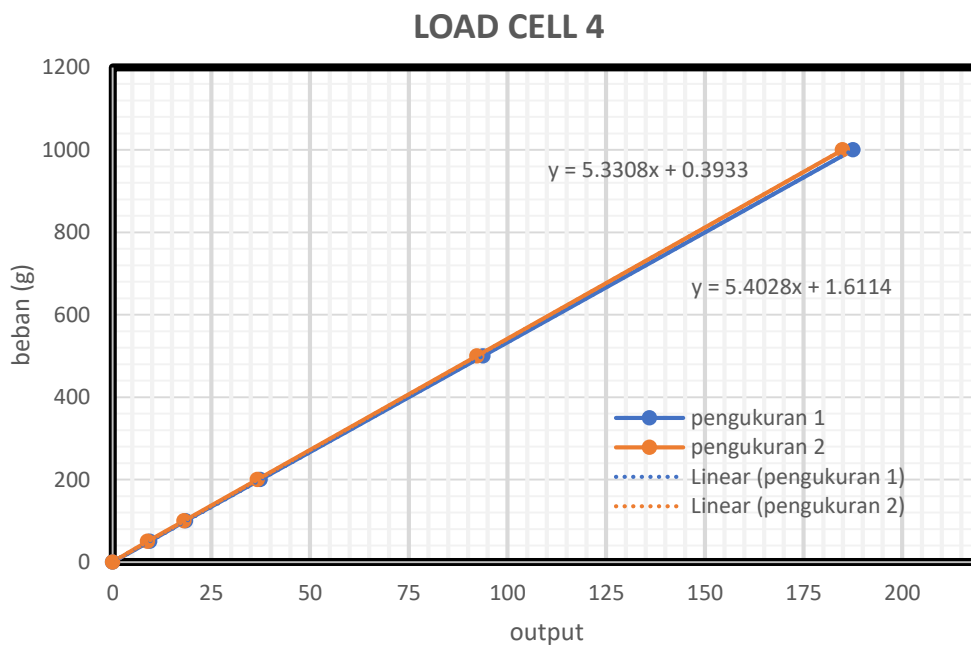
**Tabel 4.26.** Data kalibrasi *load cell 4* percobaan 1.

Beban (g)	Output ( $\circ$ )
1000	187.5
500	93.8
200	37.4
100	18.5
50	9.4
0	0

**Tabel 4.27.** Data kalibrasi *load cell* 4 Percobaan 2.

Beban (g)	Output ( $\circ$ )
1000	184.8
500	92.2
200	36.6
100	18.1
50	8.8
0	0

Data pada Tabel 4.26 dan Tabel 4.27 kemudian di-plot menjadi Gambar 4.35. Gambar 4.35 menunjukkan *Load Cell* 4 mempunyai persamaan linier sehingga bisa digunakan dengan koreksi berdasar persamaan regresi linearnya.



**Gambar 4.35.** Grafik kalibrasi Load Cell 3

Persamaan yang digunakan untuk mengkalibrasi keluaran *load cell* ditampilkan dalam Tabel 4.36.

**Tabel 4.28.** Persamaan Kalibrasi Keluaran Load Cell dengan Beban.

LOAD CELL 1	$y = 7.72x + 12.12$
LOAD CELL 2	$y = 5.28x + 0.17$
LOAD CELL 3	$y = 5.26x + 1.51$
LOAD CELL 4	$y = 5.40x + 1.61$

## 4.5. RAO TERAPUNG BEBAS

### 4.5.1. Metode Analitis

#### 4.5.1.1. Mode Gerak Surge

Gerak Surge dari sebuah SPAR dapat dihitung secara analitis dengan menghitung *mass displacement* dari SPAR pada sarat yang direncanakan. Kemudian, parameter-parameter dinamis benda juga dicari seperti massa tambah, redaman dan kekakuan struktur. Setelah semua diketahui, respon gerak bangunan apung dapat dikalkulasi.

##### 1. Perhitungan *displacement*

*Displacement prototype* berdiameter ( $D$ ) 16 m yang tercelup dengan sarat ( $T$ ) 135,03 m di laut dengan massa jenis ( $\rho$ ) 1.025 kg/m<sup>3</sup> dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 4.11

$$\Delta = \frac{1}{4} \pi D^2 T \rho g \quad (4.11)$$

Tabel 4.29. menampilkan hasil perhitungan *displacement* dan perbandingannya dengan data JIP dan analisa numerik (MOSES).

**Tabel 4.29.** Perbandingan *displacement* dari hasil data, analitik dan numerik.

	DATA	ANALITIK	ERROR	NUMERIK	ERROR
<b>MASSA (kg)</b>	26531524.91	27834342.56	4.91%	27117650	2.21%

##### 2. Massa Tambah

Massa tambah dari mode gerak *surge* untuk bentuk silinder berdasarkan Sarpkaya (2010) ditampilkan dalam Persamaan



4.12 dengan massa jenis ( $\rho$ ) 1.025 kg/m<sup>3</sup> dan  $c$  jari-jari silinder 8 m. Hasil perhitungan terlampir di Tabel 4.38.

$$m_a = \rho \pi c^2 \quad (4.12)$$

### 3. Kekakuan

Pada mode gerak surge, benda terapung tidak mempunyai kekakuan, sehingga kekakuan mode gerak *surge* adalah 0

### 4. Redaman

Pada studi analitis kali ini, redaman (*damping*) dari struktur pada mode gerak surge merupakan 0 untuk penyederhanaan perhitungan.

### 5. Gaya Eksitasi

Perhitungan gaya eksitasi gelombang menggunakan perhitungan Morrison seperti Persamaan 4.13. Bangunan SPAR berbentuk silinder dengan jari-jari ( $R$ ) sebesar 8 m, koefisien Morrison ( $C_m$ ) bernilai 1, panjang silinder tercelup ( $d$ ) bernilai 108 m.

$$F_e = (1 + C_m) \rho \pi R^2 \zeta_0 g (1 - e^{-kd}) \cos(kx - \omega t) \quad (4.13)$$

### 6. RAO

Parameter-parameter dinamis dari sistem terapung yang sudah diketahui dapat dilihat di Tabel 4.30.

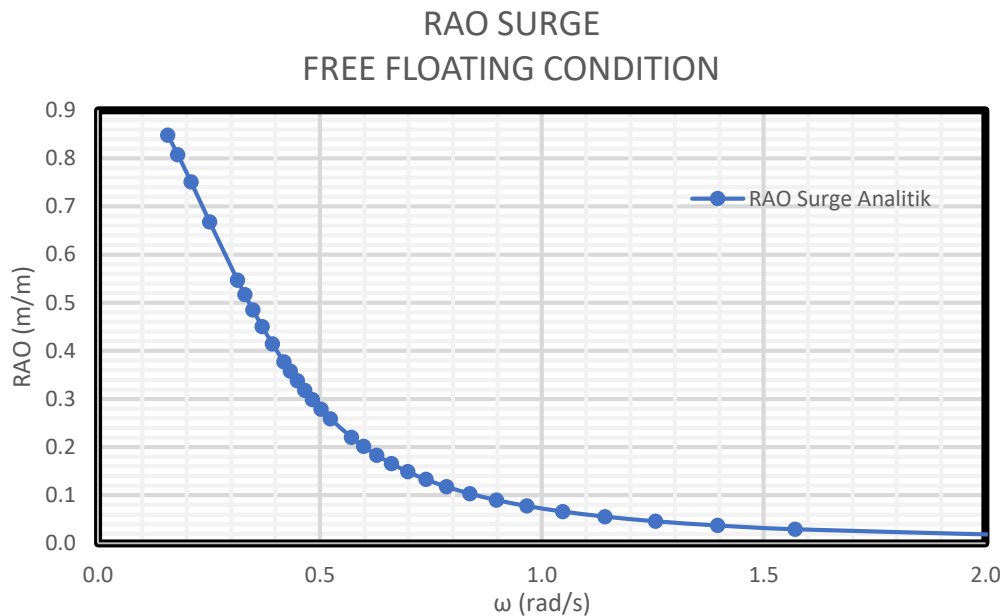
**Tabel 4.30.** Parameter Perhitungan RAO.

	BESARAN	SATUAN
<b>Displacement (m)</b>	27834342.56	kg
<b>Masa Tambah (ma)</b>	206140.00	Kg/m
<b>Kekakuan (k)</b>	0	N/m
<b>Damping (b)</b>	0	Ns/m

Persamaan 4.14 merupakan persamaan respon gerak bangunan. Nilai respon gerak bangunan apung akan sama dengan RAO jika dalam perhitungan amplitudo gelombang adalah 1 m.

$$\zeta_{x0} = \frac{F_e}{\sqrt{\{k_x - (m + a_x)\omega^2\}^2 + (b_x\omega)^2}} \quad (4.14)$$

Tabulasi perhitungan RAO dapat dilihat di LAMPIRAN dengan sumbu absis sebagai frekuensi gelombang dan koordinat sebagai RAO. Gambar 4.36 menampilkan grafik RAO untuk gerak *surge*.



**Gambar 4.36.** Grafik RAO *surge* analitis

#### 4.5.1.2. Mode Gerak Heave

Pada mode gerak *heave* parameter dinamisnya berbeda, yaitu massa tambah, kekakuan benda, damping dan gaya eksitasinya.

##### 1. Perhitungan *displacement*

*Displacement* SPAR dalam mode gerak *heave* sama dengan dalam mode gerak *surge* sehingga, nilai *displacement* yang digunakan seperti Tabel 4.39.

##### 2. Massa Tambah

Massa tambah dari mode gerak *heave* untuk bentuk silinder berdasarkan Sarpkaya (2010) ditampilkan dalam persamaan 4.15, dengan massa jenis ( $\rho$ )  $1.025 \text{ kg/m}^3$  dan  $c$  jari-jari silinder 8 m. Namun, pada kasus SPAR permukaan yang tercelup merupakan setengah bagian, sehingga massa tambah SPAR menjadi  $1/2 m_a$ . Hasil perhitungan terlampir di Tabel 4.39.

$$m_a = \frac{8}{3} \rho c^3 \quad (4.15)$$

### 3. Kekakuan

Pada mode gerak *heave* kekakuan struktur dapat dihitung dengan persamaan 4.16, dengan massa jenis ( $\rho$ ) 1.025 kg/m<sup>3</sup>, percepatan gravitasi ( $g$ ) 9.81 m/s<sup>2</sup> dan  $A_w$  merupakan luas bidang air (*Water Plane Area*, WPA). SPAR mempunyai luas bidang air berbentuk lingkaran sehingga besar kekakuan gerak *heave* dilampirkan dalam Tabel 4.39.

$$k_{33} = \rho g A_w \quad (4.16)$$

### 4. Damping

Pada studi analitis kali ini, damping dari struktur pada mode gerak *heave* digunakan nilai 0 untuk penyederhanaan perhitungan. Nilai damping 0 akan menghasilkan nilai tak terhingga pada frekuensi naturalnya. Untuk menyiasati hal tersebut, pada saat melakukan tabulasi, frekuensi tabulasinya tidak pas saat frekuensi natural benda. Hasil yang didapat menunjukkan tendensi yang sama dengan perhitungan numerik MOSES.

### 5. Gaya Eksitasi

Menurut Journee (2001) gaya eksitasi gelombang pada silinder dalam mode gerak *heave* ditampilkan dalam Persamaan 4.17. Dengan  $k$  angka gelombang,  $c$  kekakuan benda pada mode gerak *heave*,  $a$  massa tambah benda.  $b$  koefisien damping sistem dan  $\omega$  sebagai frekuensi.

$$\frac{F_a}{\zeta_a} = e^{-kT} \sqrt{\{c - a\omega^2\}^2 + \{b\omega\}^2} \quad (4.17)$$

### 6. RAO

Parameter-parameter dinamis dari sistem terapung untuk mode gerak *heave* terdapat dalam tabel 4.31.

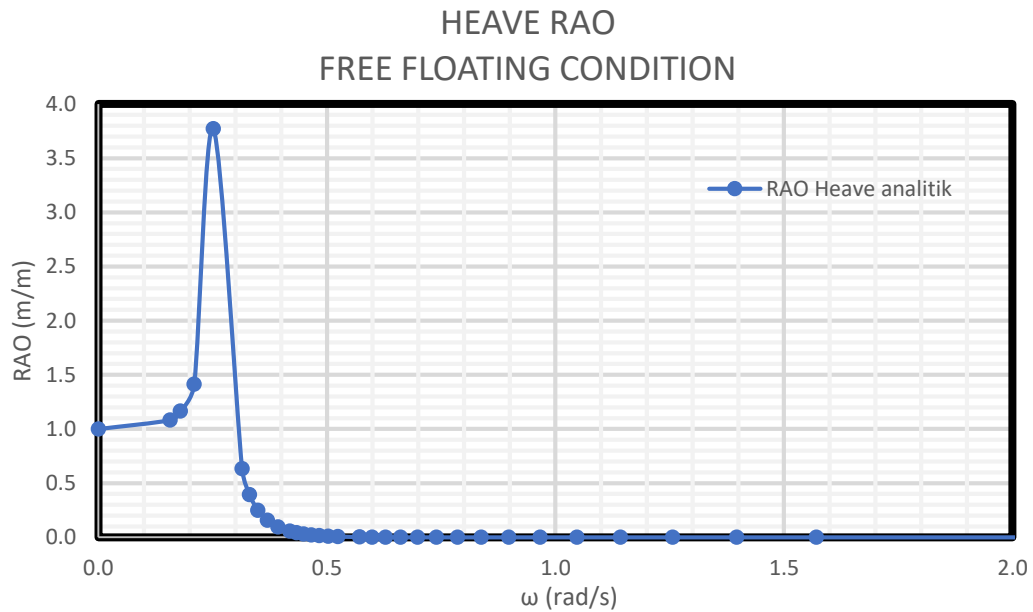
**Tabel 4.31.** Parameter Perhitungan RAO *Heave*.

	BESARAN	SATUAN
Displacement (m)	27834342.56	kg
Masa Tambah (ma)	699995.77	kg
Kekakuan (k)	2022233.43	N/m
Damping (b)	0	Ns/m

Persamaan 4.18 merupakan persamaan respon gerak bangunan. Nilai respon gerak bangunan apung akan sama dengan RAO jika dalam perhitungan amplitudo gelombang adalah 1 m

$$\zeta_{x0} = \frac{F_e}{\sqrt{\{k_x - (m + a_x)\omega^2\}^2 + (b_x\omega)^2}} \quad (4.18)$$

Tabulasi perhitungan RAO dapat dilihat di LAMPIRAN dengan sumbu absis sebagai frekuensi gelombang dan oordinat sebagai RAO. Gambar 4.37 menampilkan grafik RAO untuk gerak *heave* SPAR.



**Gambar 4.37.** Grafik RAO *heave* analitis.

#### 4.5.1.3. Mode Gerak *Pitch*

Pada mode gerak *pitch* parameter dinamisnya berbeda, yaitu massa tambah, kekakuan benda, damping dan gaya eksitasinya.

##### 1. Perhitungan *displacement*

Displacement SPAR dalam mode gerak *pitch* sama dengan dalam mode gerak *surge* maupun *heave* sehingga, nilai *displacement* yang digunakan seperti Tabel 4.40.

## 2. Momen inersia massa tambah

Momen inersia massa tambah dari SPAR dapat menggunakan rumus momen inersia massa pada sebuah silinder yang tercelup pada persamaan 4.19, dengan massa jenis ( $\rho$ )  $1.025 \text{ kg/m}^3$ ,  $R$  merupakan jari-jari SPAR sebesar 8 m dan  $l$  merupakan panjang SPAR sebesar 154.2 m.

$$I_a = \rho \pi R^2 l (l/2)^2 \quad (4.19)$$

## 3. Kekakuan

Pada mode gerak *pitch* kekakuan struktur dapat dihitung dengan Persamaan 4.20, dengan massa jenis ( $\rho$ )  $1.025 \text{ kg/m}^3$ , percepatan gravitasi ( $g$ )  $9.81 \text{ m/s}^2$  dan  $GM_L$  merupakan jarak titik *metacenter* SPAR dengan titik berat SPAR yaitu sebesar 5.6 m. SPAR mempunyai luas bidang air berbentuk lingkaran sehingga besar kekakuan gerak *pitch* dilampirkan dalam tabel 4.40.

$$k_{33} = \rho g \nabla \overline{GM_L} \quad (4.20)$$

## 4. Damping

Pada studi analitis kali ini, *damping* dari struktur pada mode gerak *pitch* digunakan nilai 0 untuk penyederhanaan perhitungan. Nilai damping 0 akan menghasilkan nilai tak terhingga pada frekuensi naturalnya. Untuk menyiasati hal tersebut, pada saat melakukan tabulasi, frekuensi tabulasinya tidak pas saat frekuensi natural benda. Hasil yang didapat menunjukkan tendensi yang sama dengan perhitungan numerik MOSES.

## 5. Momen Gaya

SPAR mengalami gerakan *pitch* diakibatkan adanya momen gaya. Sehingga persamaan momen gaya pada SPAR untuk gerakan *pitch* dapat dilihat pada persamaan 4.21.

$$M = (1 + C_M) \rho \pi R_1^2 \zeta_0 \omega^2 \cos(kx_c - \omega t) \int e^{kz} dz \quad (4.21)$$

## 6. RAO

Parameter-parameter dinamis dari sistem terapung untuk mode gerak *pitch* terdapat dalam tabel 4.32.

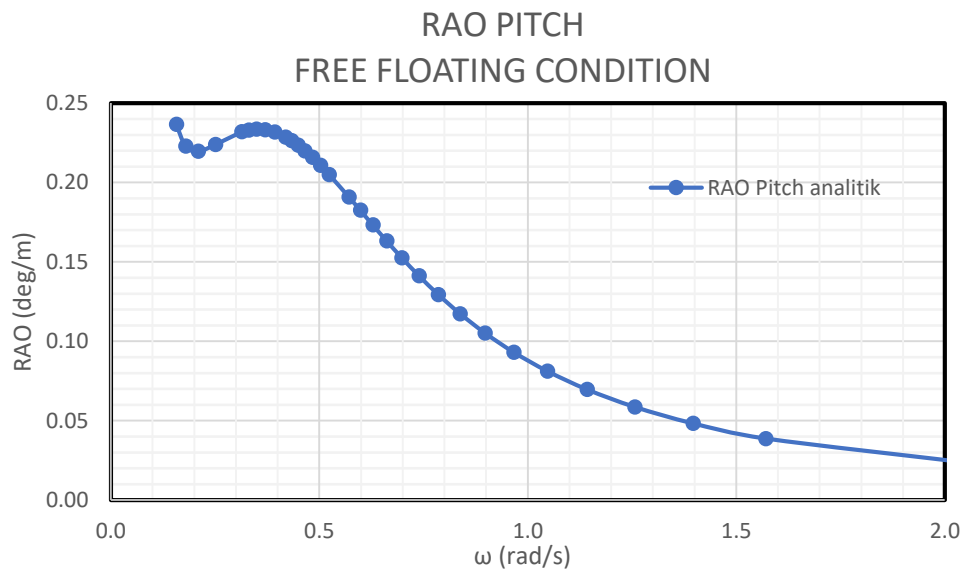
**Tabel 4.32.** Parameter Perhitungan RAO *Pitch*.

	BESARAN	SATUAN
<b>Displacement (m)</b>	27834342.56	kg
<b>Momen inersia tambah (Ia)</b>	168322693.5	ton.m <sup>2</sup>
<b>Kekakuan (k)</b>	2E+06	KN.m
<b>Damping (b)</b>	0	Ns/m

Persamaan 4.22 merupakan persamaan respon gerak bangunan. Nilai respon gerak bangunan apung akan sama dengan RAO jika dalam perhitungan amplitudo gelombang adalah 1 m

$$\zeta_{\theta} = \frac{M/k}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right\}^2 + 2b_f \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (4.22)$$

Tabulasi perhitungan RAO dapat dilihat di LAMPIRAN dengan sumbu absis sebagai frekuensi gelombang dan ordinat sebagai RAO. Gambar 4.38 menampilkan grafik RAO untuk gerak *pitch* SPAR.



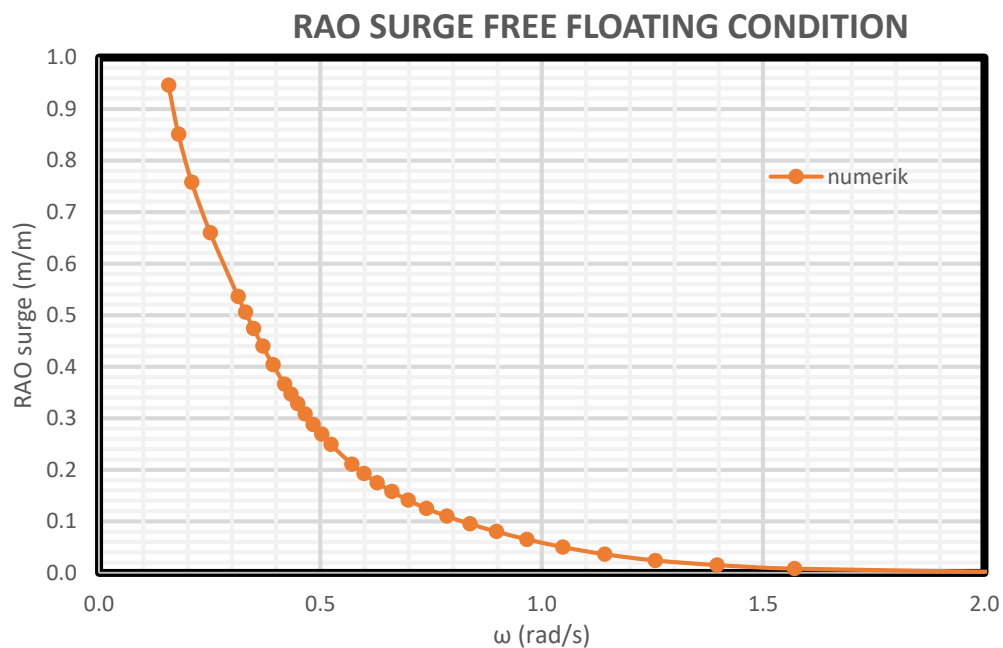
**Gambar 4.38.** Grafik RAO *pitch* analitis.

#### 4.5.2. Metode Numeris

Perhitungan numeris dari gerak bangunan apung di kondisi terapung bebas dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak MOSES dari Bentley. Model yang sudah dibuat akan dianalisis menggunakan teori *3D Panel Diffraction*. Parameter yang dimasukkan dalam perangkat lunak adalah distribusi massa dari SPAR berupa *Center of Gravity* dan Radius Girasi.

##### 4.5.2.1. Mode Gerak *Surge*

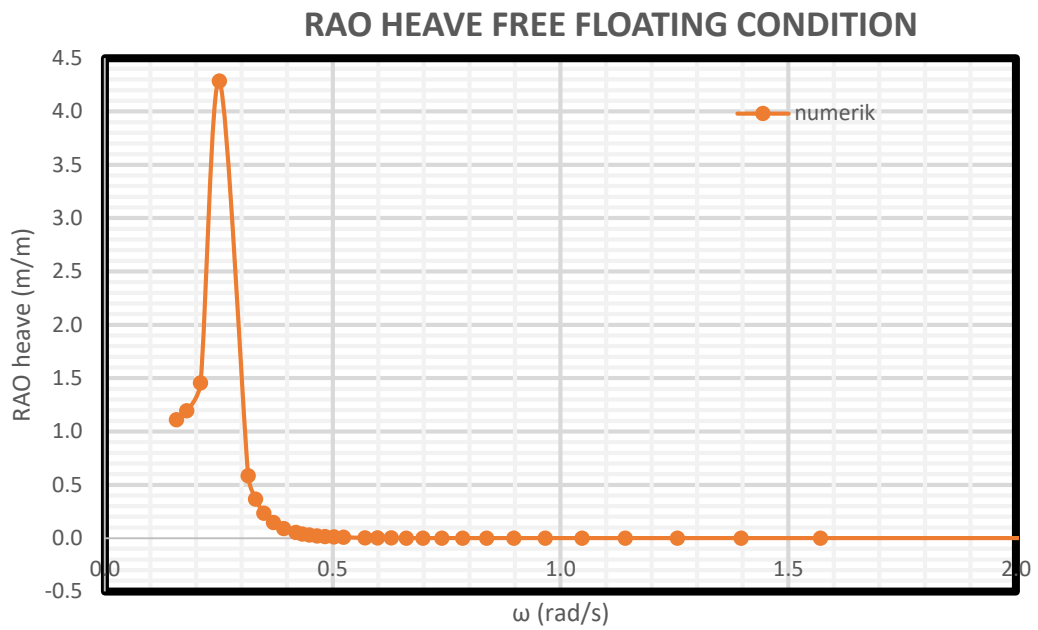
Gambar 4.39 menunjukkan RAO mode gerak *surge* dari SPAR. Pada mode gerak *surge* tidak ditemukan pembesaran nilai RAO akibat adanya resonansi. Hal ini terjadi karena gerak *surge* dari bangunan apung tidak memiliki kekakuan. Arah gelombang 0 deg memberikan respon gerak bangunan pada mode *surge* yang terbesar.



**Gambar 4.39.** Grafik RAO *surge* numerik.

##### 4.5.2.2. Mode Gerak *Heave*

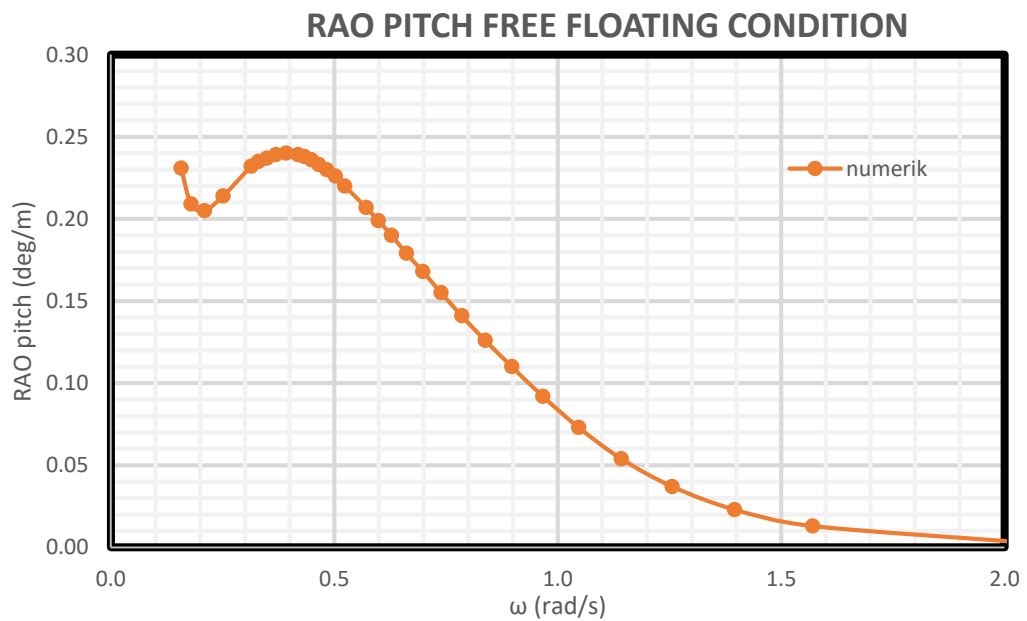
Gambar 4.40. menunjukkan RAO mode gerak *heave* dari SPAR. Arah gelombang tidak mempengaruhi nilai RAO secara signifikan, hal ini disebabkan bentuk lambung yang berupa silinder.



**Gambar 4.40.** Grafik RAO *heave* numerik.

#### 4.5.2.3. Mode Gerak *Pitch*

Gambar 4.41 menunjukkan RAO mode gerak *pitch* dari. Arah gelombang 0 deg memberikan respon gerak bangunan pada mode *pitch* yang terbesar.

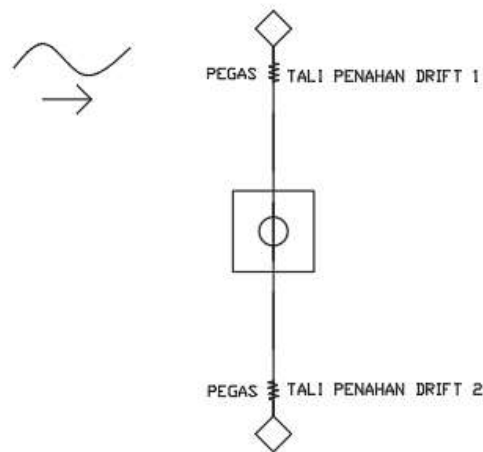


**Gambar 4.41.** Grafik RAO *pitch* numeris.



#### 4.5.3. Metode Eksperimen

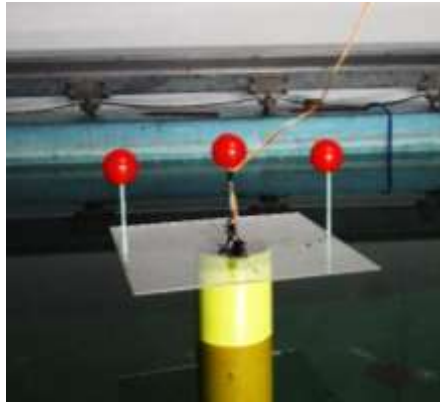
Analisa eksperimen dilakukan di Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS. Model eksperimen SPAR diletakkan di kolam dengan dimensi panjang 100 m, kedalaman 1.8 dan lebar 3 m. Pada kondisi terapung bebas SPAR diletakkan dengan konfigurasi seperti pada Gambar 4.42.



**Gambar 4.42.** Konfigurasi tali penahan *drift*.

Dua tali penahan *drift* digunakan untuk menjaga posisi dari struktur sehingga sesuai dengan arah yang diinginkan. Tali penahan *drift* dipasang renggang, hal ini dipasang sedemikian hingga agar tali tidak mempengaruhi gerak struktur, namun apabila *drifting* mampu menggeser model maka tali ini akan menahannya.

Model akan dikenai gelombang yang berasal dari *wave maker*. Model akan dikenai tujuh gelombang dengan karakteristik seperti pada tabel 4.33. Variasi gelombang yang terjadi adalah variasi periode gelombang, sedangkan besar tinggi gelombang konstan yaitu 5 cm. Penentuan periode gelombang ditentukan dengan terlebih dulu melakukan penskalaan periode gelombang lingkungan menjadi periode gelombang eksperimen.



**Gambar 4.43.** Model SPAR kondisi terapung bebas.

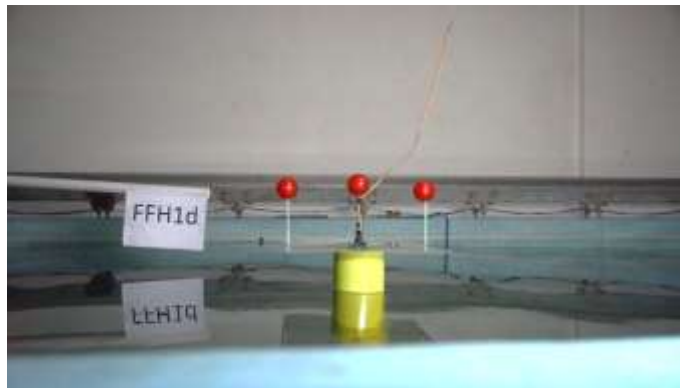


**Gambar 4.44.** Lampu untuk penerangan

Setiap eksperimen mempunyai identitas eksperimen masing-masing. Kode eksperimen digunakan untuk setiap kondisi seperti pada gambar 4.45.

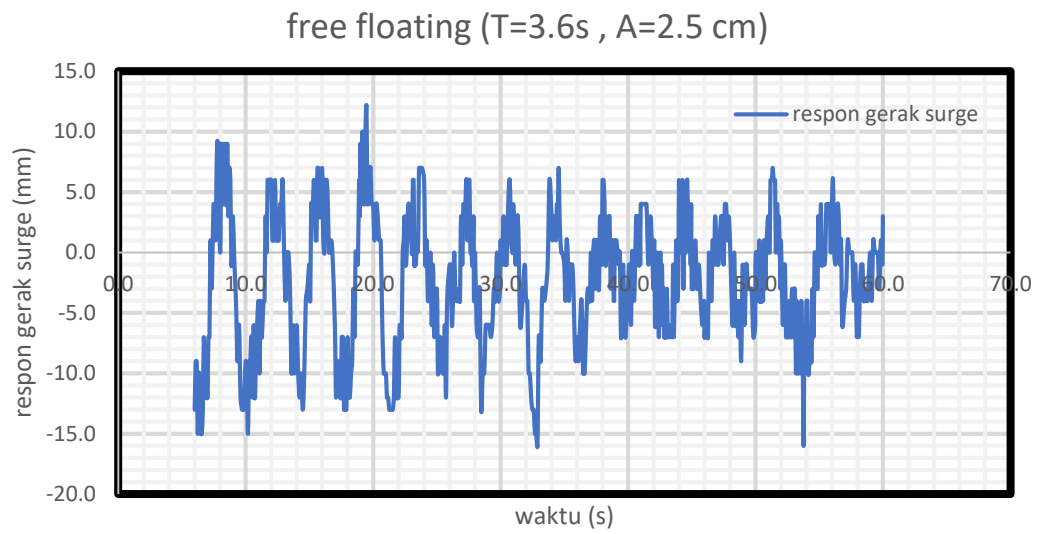
**Tabel 4.33.** Periode lingkungan dan periode eksperimen.

No.	Kode	Periode Gelombang Lingkungan (s)	Periode Gelombang Eksperimen (s)	Amplitudo Gelombang (cm)
1	FFH1a	40	3.60	2.5
2	FFH1b	30	2.70	
3	FFH1c	25	2.20	
4	FFH1d	20	1.80	
5	FFH1e	10	0.90	
6	FFH1f	35	3.10	
7	FFH1g	5.5	0.50	

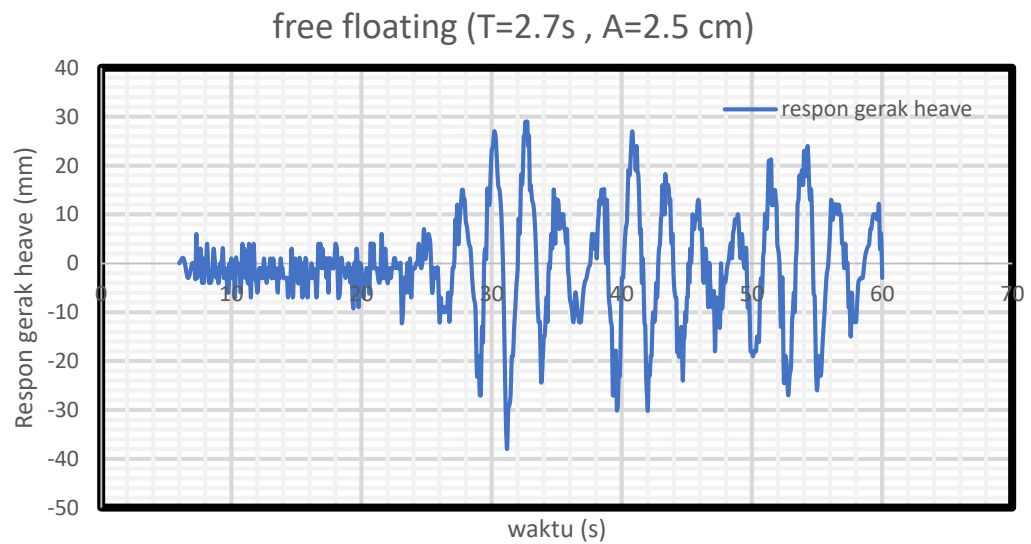


**Gambar 4.45.** Kode eksperimen.

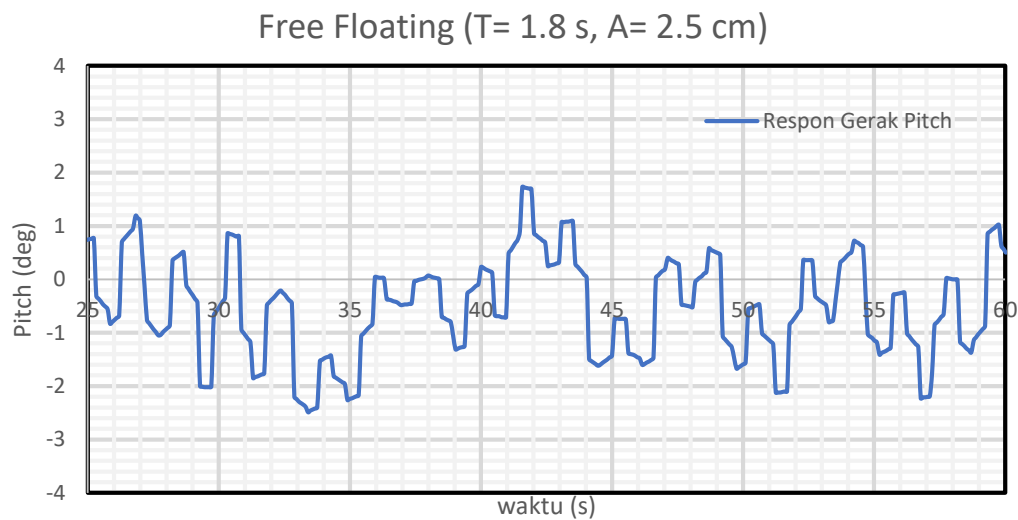
Respon dari benda yang terkena gelombang akan dicatat dengan instrumen *image processing* dan *gyroscope*. *Image processing* akan mencatat mode gerak *surge* dan *heave* sedangkan *gyroscope* akan mencatat gerak *pitch* struktur. Gambar 4.46 , 4.47 dan 4.48 di bawah ini merupakan salah satu contoh dari *time history* keluaran instrumen. Dapat dilihat hasil keluaran instrumen ada yang menunjukkan sinyal dengan frekuensi tinggi namun respon yang kecil dan ada juga sinyal dengan frekuensi rendah namun respon yang tinggi. Hal itu disebabkan karena gelombang baru saja mengenai struktur SPAR.



**Gambar 4.46.** *Time history instrumen image processing untuk gerakan surge.*



**Gambar 4.47.** *Time history instrumen image processing untuk gerakan heave.*



**Gambar 4.48.** Time History instrumen *gyroscope* untuk gerakan *pitch*.

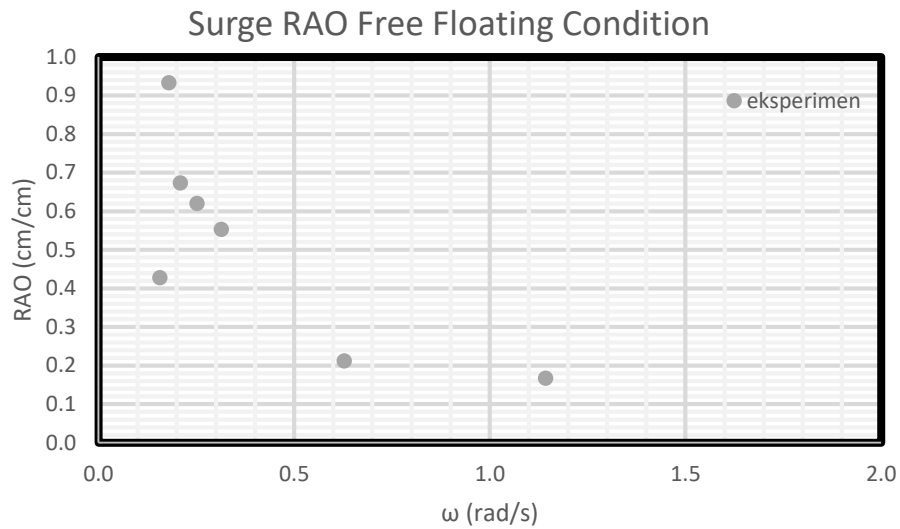
#### 4.5.3.1. Mode Gerak Surge

Setiap time history pada gerak *surge* dianalisa tinggi respon dan periode respon dari gerak yang terjadi. Analisa dilakukan dengan merata-rata respon yang terjadi untuk melihat respon gerak setiap variasi periode. RAO merupakan perbandingan antara amplitudo respon gerak dengan amplitudo gelombang. Tabel 4.34 menunjukkan respon gerak dan periode respon struktur dari setiap gerakan beserta RAO dan perbandingan periode respon dan periode gelombang.

**Tabel 4.34.** Respon gerak dan RAO gerakan *surge* hasil eksperimen.

No.	KODE	Respon Gerak (cm)	Respon Periode (s)	RAO (cm/cm)	Perbandingan Periode
1	FFH1a	1.0692	3.75	0.4277	0.96
2	FFH1b	1.6833	2.7273	0.6733	0.99
3	FFH1c	1.55	2.222	0.62	0.99
4	FFH1d	1.3833	2.00	0.5553	0.9
5	FFH1e	0,5308	1,00	0.2123	0,9
6	FFH1f	2.333	3.0769	0.9333	1.0075
7	FFH1g	0.433	0.47	0.1667	1.06

Kolom RAO pada Tabel 4.34 dapat di-*plot* untuk membuat suatu grafik RAO dari gerak *surge* yang disajikan pada Gambar 4.49 berikut ini.



**Gambar 4.49.** Grafik RAO *surge* hasil eksperimen

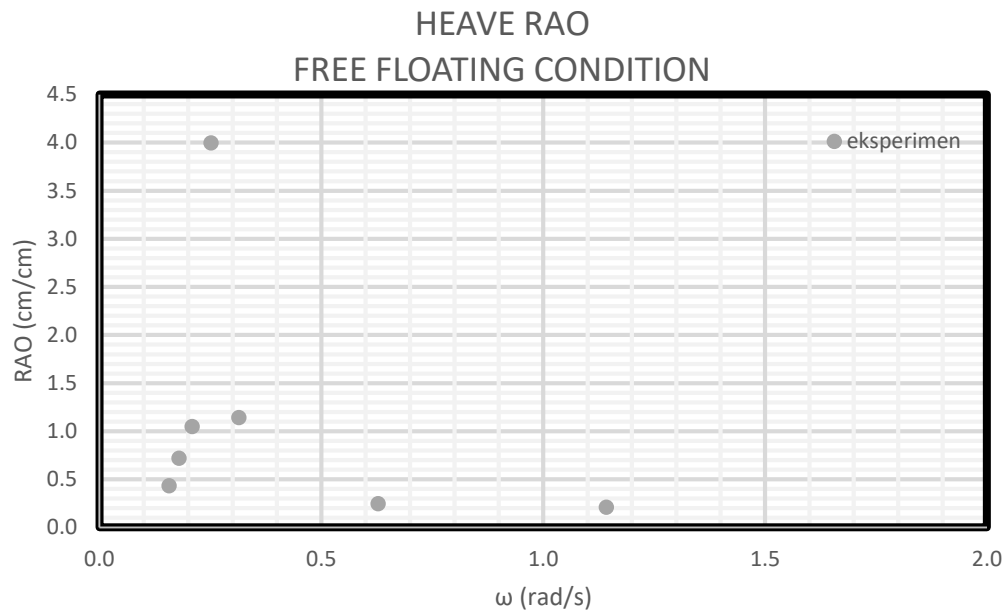
#### 4.5.3.2. Mode Gerak Heave

Setiap *time history* pada gerak *heave* dianalisa tinggi respon dan periode respon dari gerak yang terjadi. Analisa dilakukan dengan merata-rata respon yang terjadi untuk melihat respon gerak setiap variasi periode. RAO merupakan perbandingan antara amplitudo respon gerak dengan amplitudo gelombang. Tabel 4.35 menunjukkan respon gerak dan periode respon struktur dari setiap gerakan beserta RAO dan perbandingan periode respon dan periode gelombang.

**Tabel 4.35.** Respon gerak dan RAO gerakan *heave* hasil eksperimen.

No.	KODE	Respon Gerak	Respon Periode	RAO	Perbandingan Periode
1	FFH1a	1.083	3.6363	0.433	0.98
2	FFH1b	2.617	2.72	1.047	0.99
3	FFH1c	9.915	2.22	3.996	0.99
4	FFH1d	2.85	1.8181	1.14	0.99
5	FFH1e	0.614	1.00	0.246	0.9
6	FFH1f	1.8	3.00	0.72	1.033
7	FFH1g	0.528	0.56	0.21	0.9

Kolom RAO pada Tabel 4.43 dapat di-*plot* untuk membuat suatu grafik RAO dari gerak *heave* seperti pada gambar 4.50 berikut:



**Gambar 4.50.** Grafik RAO *heave* hasil eksperimen.

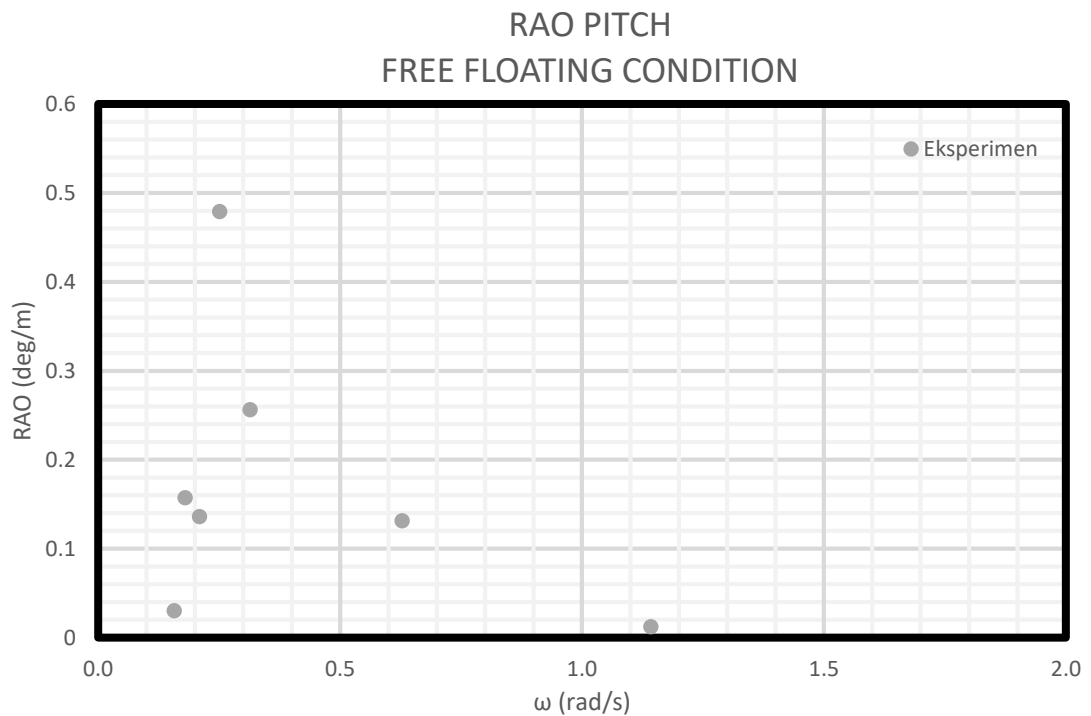
#### 4.5.3.3. Mode Gerak Pitch

Setiap *time history* pada gerak *pitch* dianalisa tinggi respon dan periode respon dari gerak yang terjadi. Analisa dilakukan dengan merata-rata respon yang terjadi untuk melihat respon gerak setiap variasi periode. RAO merupakan perbandingan antara amplitudo respon gerak dengan amplitudo gelombang. Tabel 4.44 menunjukkan respon gerak dan periode respon struktur dari setiap gerakan beserta RAO dan perbandingan periode respon dan periode gelombang.

**Tabel 4.36.** Respon gerak dan RAO gerakan *pitch* hasil eksperimen.

No.	KODE	Respon Gerak	Respon Periode	RAO (deg/cm)	Perbandingan Periode
1	FFH1a	0.074	3.316	0.030	0.947
2	FFH1b	0.339	2.926	0.136	1.084
3	FFH1c	1.021	2.089	0.479	0.950
4	FFH1d	0.641	1.890	0.256	1.050
5	FFH1e	0.327	0.956	0.131	1.062
6	FFH1f	0.391	3.203	0.156	1.033
7	FFH1g	0.026	0.465	0.012	0.931

Kolom RAO pada Tabel 4.36 dapat di-*plot* untuk membuat suatu grafik RAO dari gerak *pitch* seperti yang disajikan pada gambar 4.51. berikut ini.

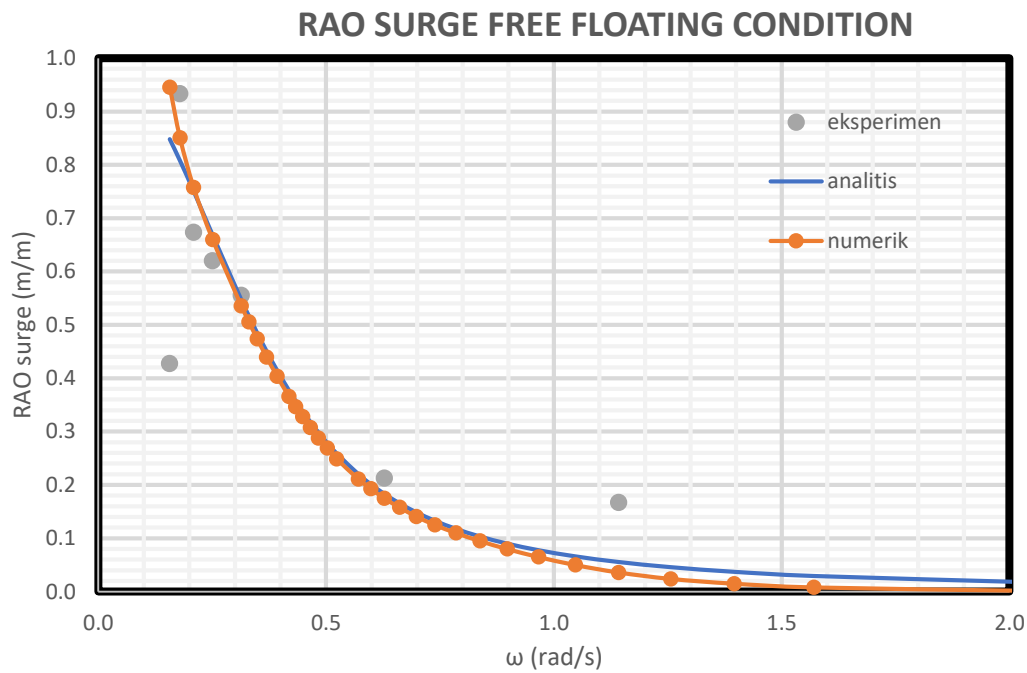


**Gambar 4.51.** Grafik RAO *pitch* hasil eksperimen.



#### 4.5.4. Perbandingan RAO Metode Analitis, Numeris dan Eksperimen

Gambar 4.52, 4.53 dan 4.54 menunjukkan perbandingan RAO terapung bebas pada arah datang gelombang 0 derajat dengan metode analitis, numeris dan eksperimen untuk tiap gerakan *surge*, *heave* dan *pitch* yang terjadi.

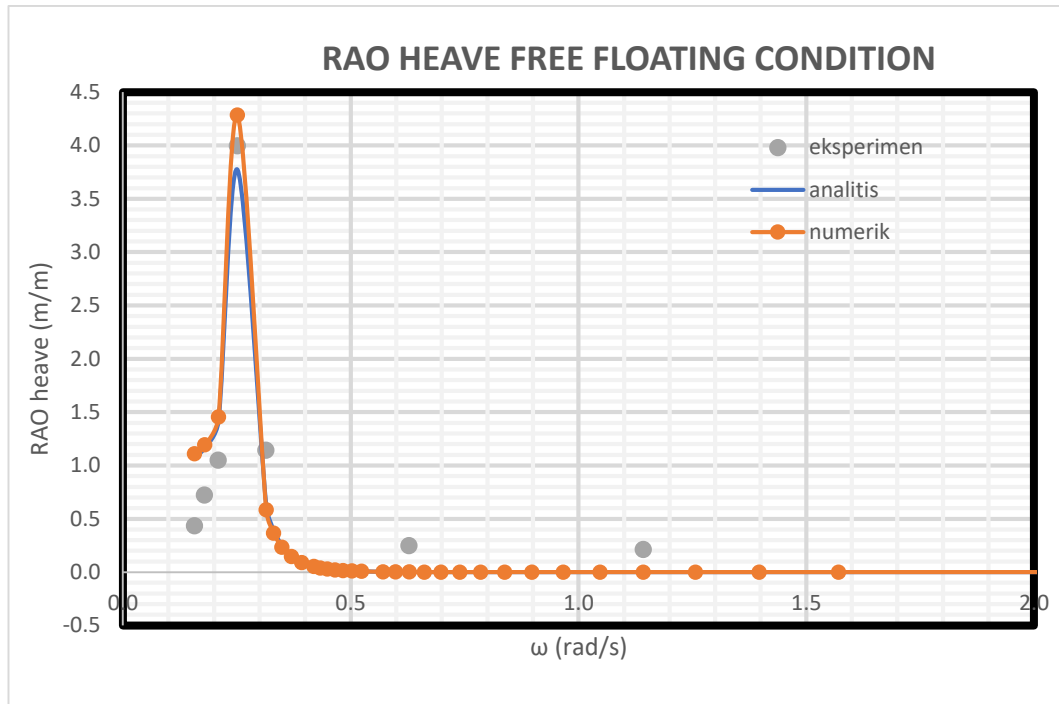


**Gambar 4.52.** Perbandingan RAO *surge* secara analitis, numeris dan eksperimen.

Metode perhitungan eksperimen analitis dan numerik menunjukkan hasil yang konsisiten untuk gerak *surge*. Tabel 4.37 menunjukkan perbandingan dari 3 metode analisa dari gerak *surge*.

**Tabel 4.37.** Perbandingan RAO *surge* terapung bebas

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
Analitis	0.157	0.848
Numeris	0.157	0.946
Eksperimen	0.180	0.933



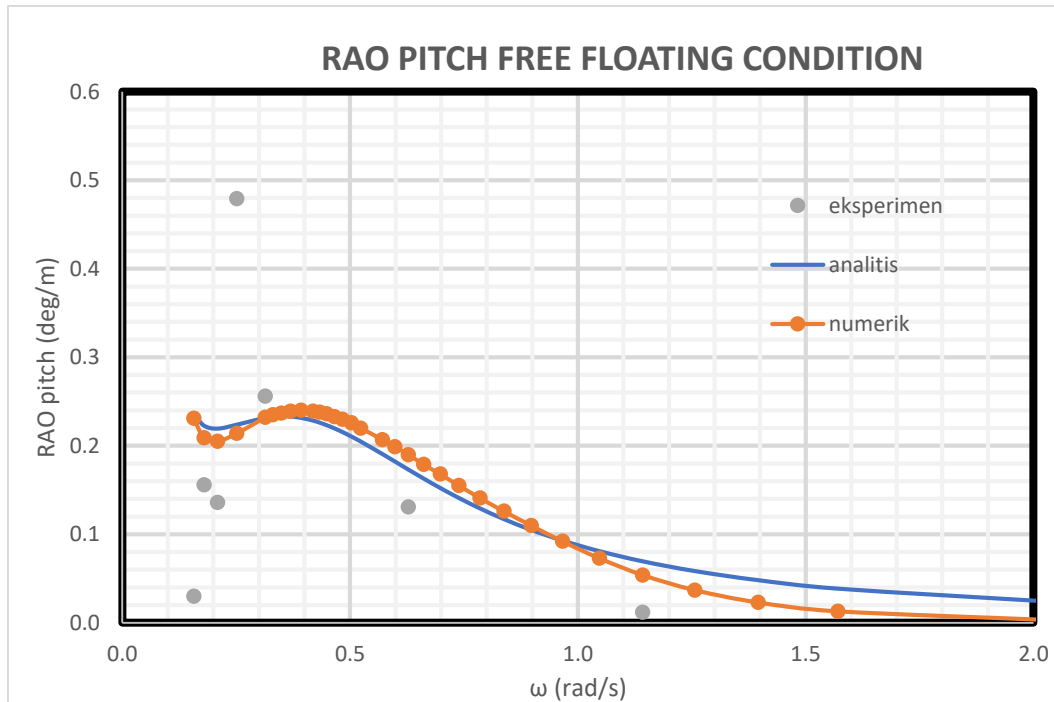
**Gambar 4.53.** Perbandingan RAO *heave* secara analitis, numeris dan eksperimen.

Metode perhitungan eksperimen analitis dan numerik menunjukkan hasil yang konsisten untuk gerak pitch. Peristiwa resonansi juga tertangkap oleh metode eksperimen di frekuensi yang sama dengan metode analitis dan metode numeris. Tabel 4.38 menunjukkan perbandingan dari 3 metode analisa gerak pitch

**Tabel 4.38.** Perbandingan RAO heave terapung bebas

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
Analitis	0.251	3.772
Numeris	0.251	4.283
Eksperimen	0.251	3.996

Pada gerak pitch terjadi perbedaan yang cukup signifikan dari metode eksperimen. Hal ini disebabkan adanya tali penahan drift yang kemungkinan merubah titik resonansi gerak pitch. Tabel 4.39 menunjukkan perbandingan ketiga metode.



**Gambar 4.54.** Perbandingan RAO *pitch* secara analitis, numeris dan eksperimen.

**Tabel 4.39.** Perbandingan RAO *pitch* terapung bebas

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
Analitis	0.157	0.237
Numeris	0.393	0.24
Eksperimen	0.251	0.479

## 4.6. RAO TERTAMBAT

### 4.6.1. Kekakuan Tali Tambat

Pada bangunan tertambat kekakuan hidrostatik benda akan ditambahkan dengan kekakuan tali tambat. Pada kekakuan hidrostatik, mode gerak yang memiliki kekakuan hanya gerak *heave*, *roll* dan *pitch*. Namun dengan adanya kekakuan tali tambat, ke enam mode gerak (*surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch* dan *yaw*) memiliki kekakuan baru. Pada Tugas Akhir ini, konfigurasi tali tambat merupakan jenis *taut* dan perhitungan kekakuan *surge* diselesaikan menggunakan Faltinsen (1990), kekakuan *heave* diselesaikan menggunakan Al-Solihat dan Nahon (2015) dan kekakuan *pitch* menggunakan Jain (1980). Kondisi taut mempunyai kekakuan karakteristik

sesuai dengan Persamaan 4.23, dengan  $E$  sebagai modulus elastis tali,  $A$  sebagai luas penampang tali dan  $L_o$  sebagai panjang tali kondisi tak terenggang. Perhitungan Persamaan 4.23 dilakukan dengan data berdasar Tabel 4.18.

$$k_I = \frac{EA}{L_o}$$

$$k_I = \frac{11175000000}{211.75} \quad (4.23)$$

$$k_I = 5548996.458 \text{ N/m}$$

Pada kondisi *taut*, tali juga memiliki *pre-tension*, yang akan merubah panjang tali sesuai dengan Persamaan 4.24, dengan  $L_o$  sebagai panjang tali tak terenggang,  $T$  sebagai pretension,  $E$  modulus elastisitas dan  $A$  sebagai luas penampang. Tabel 4.40 menunjukkan nilai *pre-tension* dan panjang yang terjadi.

$$L = L_o \left(1 + \frac{T}{EA}\right) \quad (4.24)$$

**Tabel 4.40.** Perhitungan *Pre Tension* dan Panjang Akibat *Pre-Tension*.

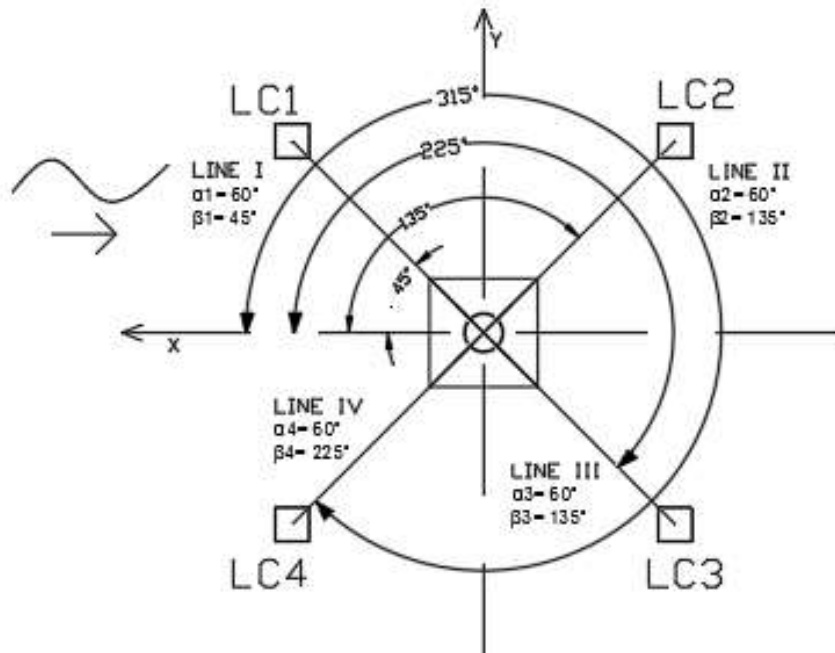
<b>T</b>	904874.4	N
<b>L</b>	225.173	m

#### 4.6.1.1. Kekakuan *Surge*

Kekakuan *surge* dapat dicari dengan menggunakan Persamaan 4.25, dengan  $k_i$  sebagai kekakuan parametrik,  $N$  sebagai jumlah tali dan  $\beta$  sebagai sudut sebar tali tambat (Gambar 4.55). Sudut sebar dapat dilihat pada tabel 4.41. Persamaan 4.25 menunjukkan bahwa kekakuan *surge* total merupakan penjumlahan dari kekakuan tiap tali. Hasil perhitungan kekakuan tiap tali dapat dilihat di tabel 4.42.

**Tabel 4.41.** Sudut sebar tali.

Sudut Sebar-Line (deg)	
$\beta_1$	45
$\beta_2$	135
$\beta_3$	225
$\beta_4$	315



**Gambar 4.55.** Konfigurasi SPAR.

$$C_{11} = \sum_{i=1}^N k_i \cos^2 \beta_i \quad (4.25)$$

**Tabel 4.42.** Kekakuan *surge*.

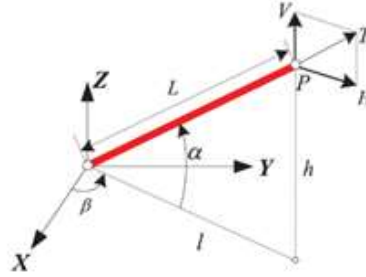
	<b>K11</b>	
LineA	2774498.23	N/m
LineB	2774498.23	N/m
LineC	2774498.23	N/m
LineD	2774498.23	N/m
<b>K11 (TOTAL)</b>	<b>11097992.92</b>	<b>N/m</b>

#### 4.6.1.2. Kekakuan *Heave*

Al-Solihat dan Nahon (2015) menentukan konfigurasi kekakuan tali dengan menggunakan Gambar 4.56. Konfigurasi tali tambat pada SPAR kali ini memiliki bentuk sesuai dengan Gambar 4.55.

Setiap tali memiliki kekakuan karakteristik sesuai dengan persamaan 4.26, dengan  $H$  sebagai gaya horizontal,  $V$  gaya Vertikal,

$l$  jarak horizontal *fairlead* dengan *anchor* dan  $h$  sebagai tinggi (Gambar 4.56).



**Gambar 4.56.** Parameter geometris tali tambat. (Al-Solihat dan Nahon, 2015)

**Tabel 4.43.** Konfigurasi Sudut Tanah-Tali.

Sudut Tanah-Line (deg)	
$\alpha 1$	60
$\alpha 2$	60
$\alpha 3$	60
$\alpha 4$	60

$$K^p = \begin{bmatrix} K_{11}^p & K_{12}^p \\ K_{21}^p & K_{22}^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial H}{\partial l} & \frac{\partial H}{\partial h} \\ \frac{\partial V}{\partial l} & \frac{\partial V}{\partial h} \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

Konfigurasi *Taut Mooring* juga memiliki pendekatan Al-Solihat dan Nahon (2015) seperti Persamaan 4.27 (a-e).

$$H = T \cos \alpha \quad (4.27a)$$

$$V = T \sin \alpha \quad (4.27b)$$

$$l = L \cos \alpha \quad (4.27c)$$

$$h = L \sin \alpha \quad (4.27d)$$

Persamaan 4.26 diturunkan oleh Al-Solihat & Nahon (2015) sehingga menghasilkan Persamaan 4.28.

$$\frac{\partial H}{\partial l} = \cos^2 \alpha K_I + \frac{T}{L} \sin^2 \alpha \quad (4.28a)$$

$$\frac{\partial V}{\partial h} = \sin^2 \alpha K_I + \frac{T}{L} \cos^2 \alpha \quad (4.28b)$$

$$\frac{\partial H}{\partial h} = \frac{\partial V}{\partial l} = \cos\alpha \sin\alpha \left[ K_I - \frac{T}{L} \right] \quad (4.28c)$$

Dengan data pada Tabel 4.16 maka karakteristik kekakuan pada setiap tali dilampirkan pada Tabel 4.44.

**Tabel 4.44.** Kekakuan Karakteristik.

	<b>k<sub>p11</sub> (N/m)</b>	<b>k<sub>p22</sub> (N/m)</b>	<b>k<sub>p12</sub> (N/m)</b>
<b>Line A</b>	1389644.402	4162545.773	2401403.029
<b>Line B</b>	1389644.402	4162545.773	2401403.029
<b>Line C</b>	1389644.402	4162545.773	2401403.029
<b>Line D</b>	1389644.402	4162545.773	2401403.029

Al-Solihat & Nahon (2015) menentukan untuk gerakan *heave* dapat diselesaikan menggunakan Persamaan 4.29.

$K_{33} = K_{22}^p$	(4.29)
---------------------	--------

Setiap tali memberi kekakuan tambahan pada setiap mode gerak, sehingga kekakuan total merupakan penjumlahan dari kekakuan mode gerak pada setiap tali, sesuai dengan Persamaan 4.30. Kekakuan total tali tambat *heave* dapat dilihat di tabel 4.45.

$K_m = \sum_{i=1}^N [K_m^{(i)}]$	(4.30)
----------------------------------	--------

**Tabel 4.45.** Kekakuan mode gerak *heave*.

	<b>k33</b>	
<b>LineA</b>	4162814.85	N/m
<b>LineB</b>	4162814.85	N/m
<b>LineC</b>	4162814.85	N/m
<b>LineD</b>	4162814.85	N/m
<b>K33 (TOTAL)</b>	16651259.40	N/m

#### 4.6.1.3. Kekakuan *Pitch*

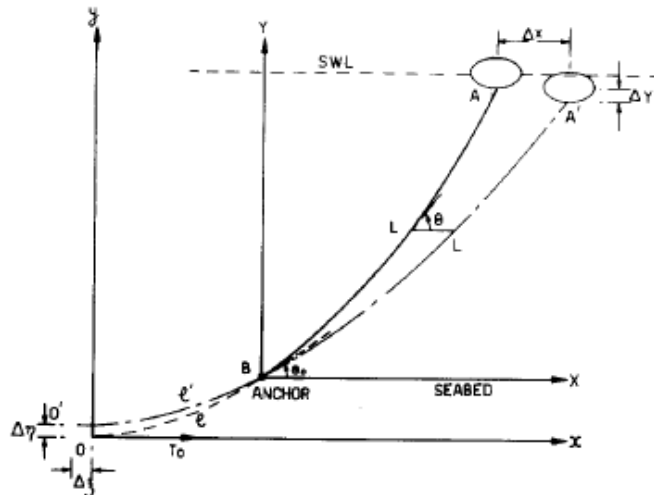
Jain (1980) membuat persamaan simplifikasi untuk mencari kekakuan benda tertambat. Hal ini dilakukan dengan memberi titik tambat bayangan, seperti pada Gambar 4.57. Persamaan 4.31 merupakan hasil penurunan untuk gerak *pitch* dengan  $T_o$  sebagai *pre-tension* sumbu x,  $X$  jarak radius *fairlead* dengan anchor,  $Y$  sebagai kedalaman,  $L'$  sebagai panjang baru, dan  $l$  sebagai panjang bayangan.

$$k_{55} = T_o \left[ w \left( \frac{T_B L' - T_A l}{T_A - T_B} \right) \left\{ \frac{X}{T_o} - \left( \frac{T_B L' - T_A l}{T_A T_B} \right) \right\} - \frac{T_o^2 Y}{T_A T_B} \right]^{-1} \quad (4.31)$$

$T_a$  dan  $T_b$  merupakan tegangan tali di titik A dan titik B dengan Persamaan 4.32. dan 4.33. Perhitungan kekakuan tali tambat dapat dilihat di tabel 4.46.

$$T_A = T_o \left[ 1 + \left( \frac{w L'}{T_o} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.32)$$

$$T_B = T_o \left[ 1 + \left( \frac{w l}{T_o} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.33)$$



**Gambar 4.57.** Titik bayangan. (Jain, 1980)



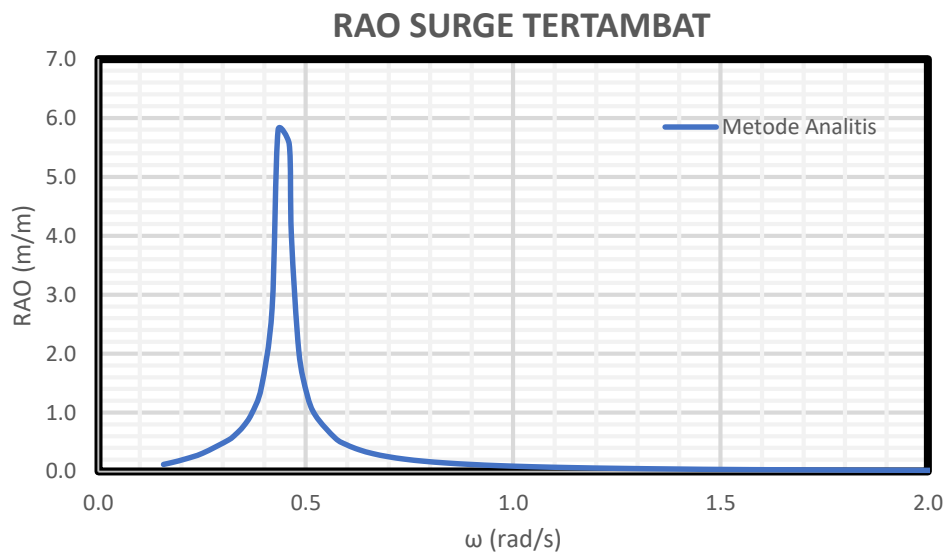
**Tabel 4.46.** Kekakuan mode gerak *pitch*.

	<b>K55</b>	
Line 1	5765049068.151	N
Line 2	5765049068.151	N
Line 3	5765049068.151	N
Line 4	5765049068.151	N
<b>K55 Total</b>	<b>23060196272.604</b>	<b>N</b>

#### 4.6.2. Metode Analitis

##### 4.6.2.1. Mode Gerak *Surge*

Tabel 4.50 menunjukkan kekakuan tiap tali tambat beserta kekakuan total mode gerak *surge*. Dengan menggunakan metode yang sama seperti kondisi terapung bebas, maka RAO dari *surge* tertambat dihitung dengan metode analitis. Tabulasi perhitungan dapat dilihat di LAMPIRAN. Gambar 4.58 merupakan grafik RAO *surge*. RAO tertinggi dari *surge* tertambat secara analitis sebesar 5.796 m/m pada frekuensi 0.43 rad/s.

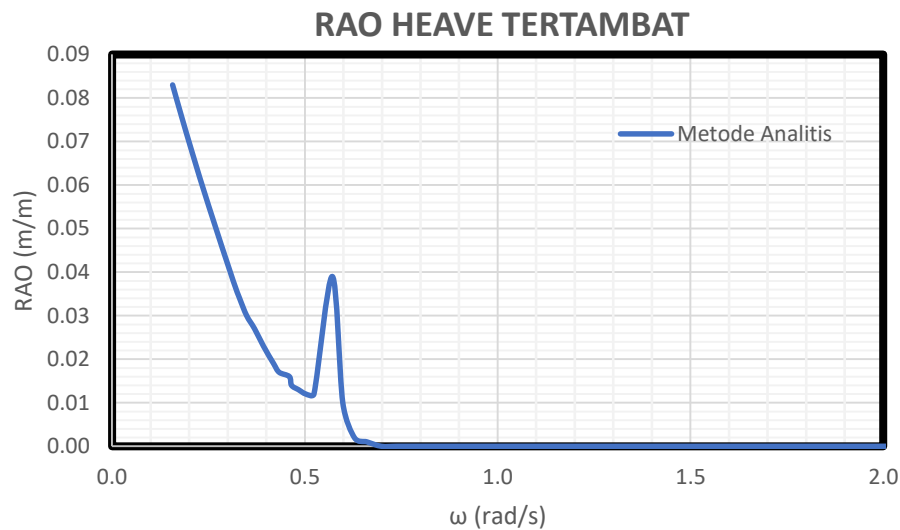


**Gambar 4.58.** RAO *Surge* tertambat metode analitis.

##### 4.6.2.2. Mode Gerak *Heave*

Kekakuan total merupakan penjumlahan dari kekakuan *heave* setiap tali tambat. Tabel 4.53 menunjukkan kekakuan tiap tali tambat beserta kekakuan total. Dengan menggunakan metode yang sama

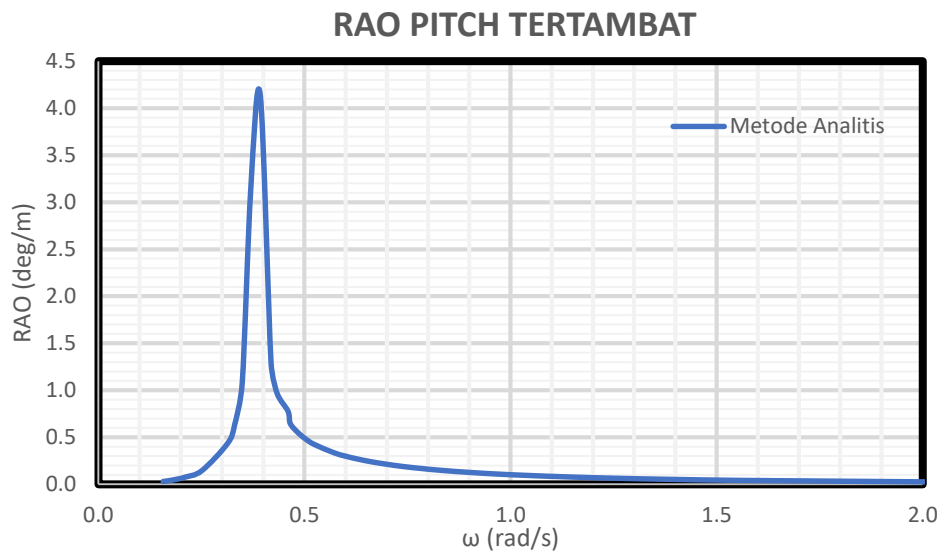
seperti kondisi terapung bebas, maka RAO dari *heave* tertambat dengan metode analitis dapat dihitung. Tabulasi perhitungan dapat dilihat di LAMPIRAN. Gambar 4.59 merupakan grafik RAO *Heave* tertambat. RAO tertinggi dari *surge* tertambat secara analitis sebesar 0.083 m/m pada frekuensi 0.16 rad/s.



**Gambar 4.59.** RAO *heave* tertambat metode analitis.

#### 4.6.2.3. Mode Gerak Pitch

Kekakuan total merupakan penjumlahan dari kekakuan *pitch* setiap tali tambat. Tabel 4.54 menunjukkan kekakuan tiap tali tambat beserta kekakuan total mode gerak *pitch*. Dengan menggunakan metode yang sama seperti sub-bab, maka RAO dari *pitch* tertambat dengan metode analitis. Gambar 4.60. merupakan grafik RAO *pitch* tertambat. RAO tertinggi dari *surge* tertambat secara analitis sebesar 4.138 deg/m pada frekuensi 0.39 rad/s.



**Gambar 4.60.** RAO *Pitch* tertambat metode analitis.

#### 4.6.3. Metode Numeris

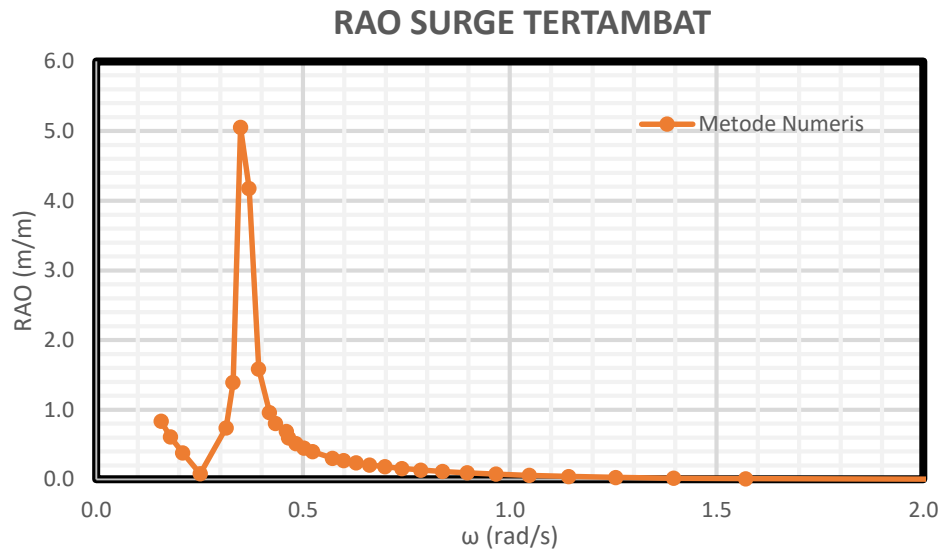
Perhitungan numeris dari gerak bangunan apung di kondisi tertambat dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak MOSES dari Bentley. Model yang sudah dibuat akan dianalisis menggunakan teori *3D Panel Diffraction*. Metode yang digunakan mirip dengan kondisi terapung bebas, tetapi dengan penambahan tali tambat dan parameternya. Dalam analisa numeris dilakukan perhitungan dari arah datang gelombang 0 derajat.



**Gambar 4.61.** Kondisi tertambat dalam MOSES

#### 4.6.3.1. Mode Gerak Surge

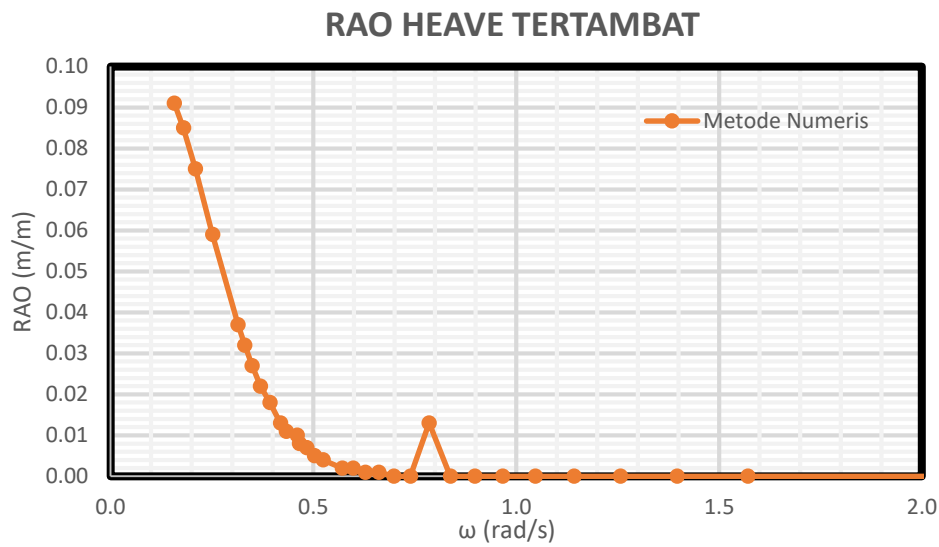
Gambar 4.62 menunjukkan RAO mode gerak *surge* dari SPAR dengan arah datang gelombang 0 derajat. Hasil dari perhitungan perangkat lunak MOSES terdapat pada LAMPIRAN. RAO tertinggi dari *surge* tertambat secara numeris sebesar 5.053 m/m pada frekuensi 0.35 rad/s.



**Gambar 4.62.** RAO *surge* tertambat metode numerik.

#### 4.6.3.2. Mode Gerak Heave

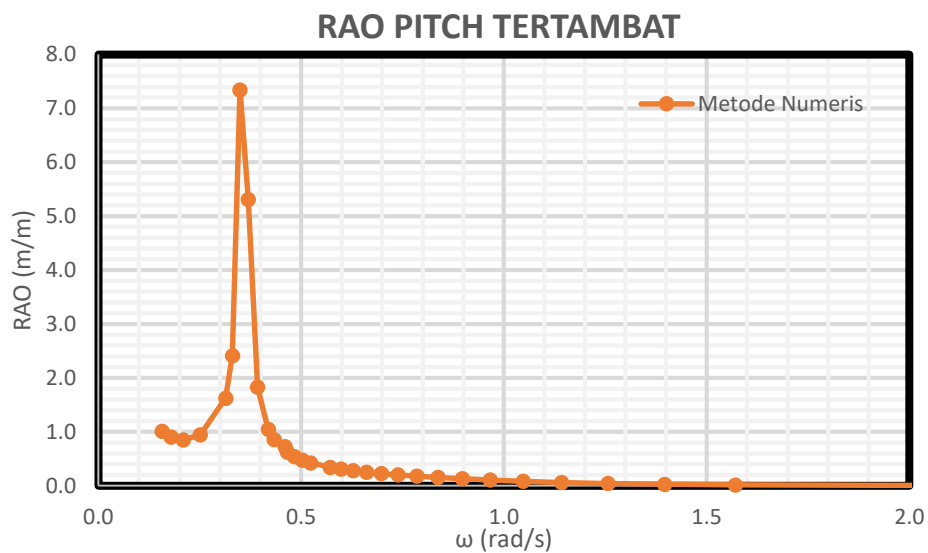
Gambar 4.63 menunjukkan RAO mode gerak *heave* dari SPAR dengan arah datang gelombang 0 derajat. Hasil dari perhitungan perangkat lunak MOSES terdapat pada LAMPIRAN. RAO tertinggi dari *heave* tertambat secara numeris sebesar 0.091 m/m pada frekuensi 0.16 rad/s.



**Gambar 4.63.** RAO *heave* tertambat metode numerik.

#### 4.6.3.3. Mode Gerak *Pitch*

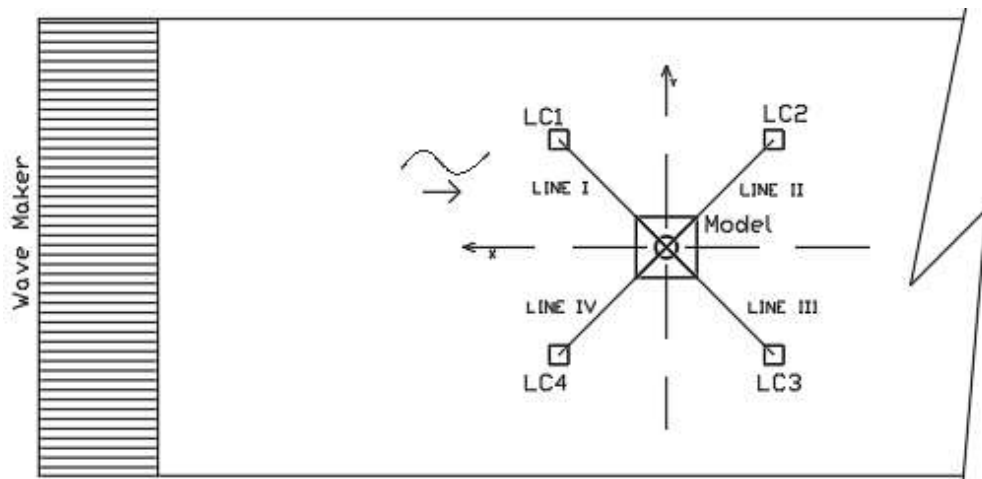
Gamba 4.64 menunjukkan RAO mode gerak *pitch* dari SPAR dengan arah datang gelombang 0 derajat. RAO tertinggi dari *pitch* tertambat secara numeris sebesar 7.344 deg/m pada frekuensi 0.35 rad/s.



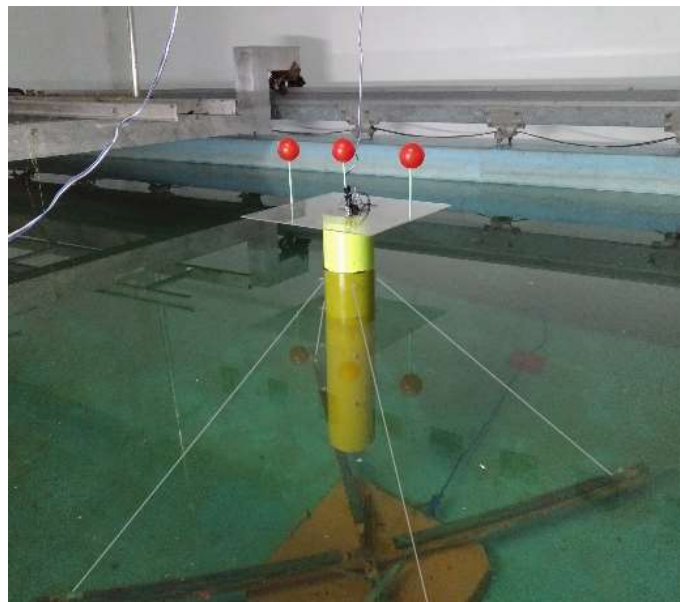
**Gambar 4.64.** RAO *pitch* tertambat metode numerik.

#### 4.6.4. Metode Eksperimen

Analisa eksperimen dilakukan di Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS. Model fisik diletakkan di kolam dengan dimensi panjang 100 m, kedalamann 1.8 dan lebar 3 m. Pada kondisi tertambat model fisik diletakkan dengan konfigurasi seperti pada Gambar 4.65. SPAR dalam kondisi tertambat di laboratorium Hidrodinamika ITS ditunjukkan pada gambar 4.66.



**Gambar 4.65.** Konfigurasi eksperimen model fisik tertambat.



**Gambar 4.66.** Ekseperimen SPAR Tertambat

Tali tambat yang digunakan sebanyak empat buah yang diatur dengan panjang yang sama dan tali dipasang dalam kondisi *taut*. Tali tambat

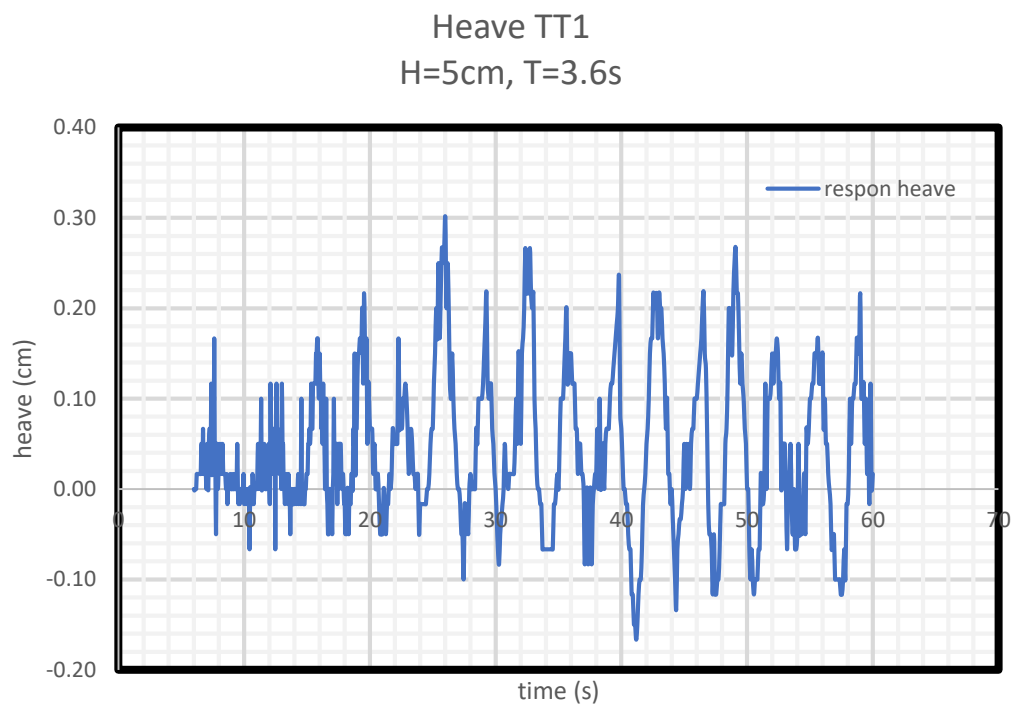
dihubungkan pada *load cell* yang berada pada jangkar yang telah berada di dasar kolam untuk mencatat tegangan tali yang terjadi.

Model akan dikenai gelombang yang berasal dari *wave maker*. Model akan dikenai 9 gelombang dengan karakteristik seperti pada tabel 4.47. Variasi gelombang yang terjadi adalah variasi periode gelombang, sedangkan tinggi gelombang konstan. Penentuan periode gelombang ditentukan dengan terlebih dulu melakukan penskalaan periode gelombang lingkungan menjadi periode gelombang eksperimen.

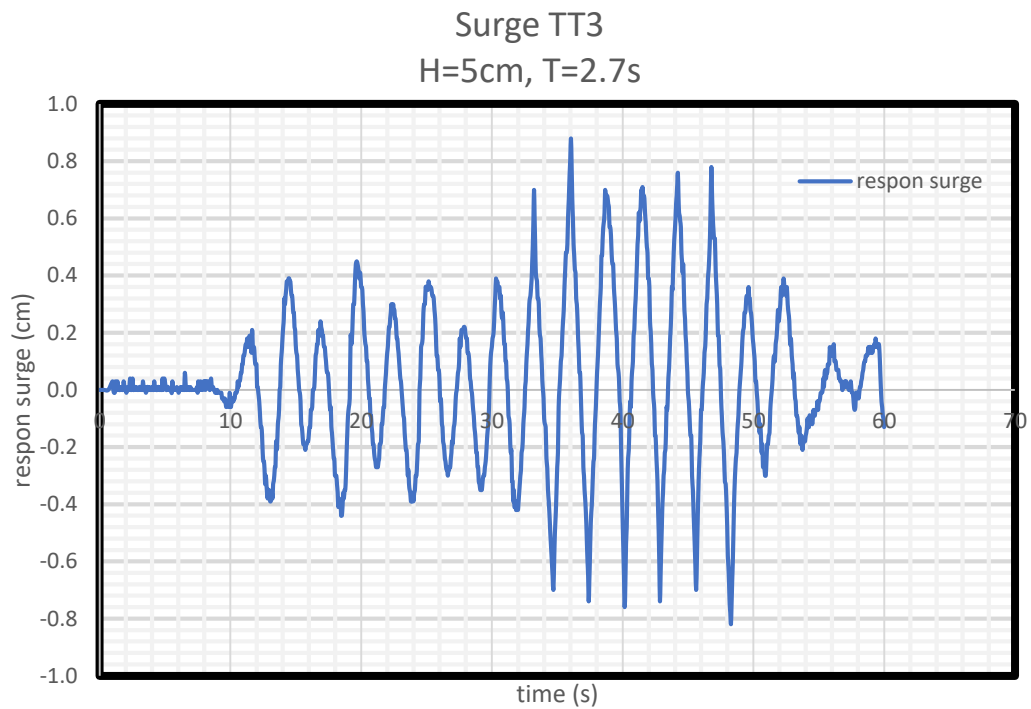
Respon dari benda yang terkena gelombang akan dicatat dengan instrumen *image processing* dan *gyroscope*. *Image processing* akan mencatat mode gerak *surge* dan *heave* sedangkan *gyroscope* akan mencatat gerak *pitch* struktur. Gambar 4.67, 4.68 dan 4.69 merupakan salah satu contoh dari *time history* hasil dari instrumen.

**Tabel 4.47.** Periode lingkungan dan periode eksperimen model fisik tertambat yang digunakan.

No.	Kode	Periode Gelombang Lingkungan (s)	Periode Gelombang Eksperimen (s)	Amplitudo Gelombang (cm)
1	TT1	40	3.6	2.5
2	TT2	35	3.1	
3	TT3	30	2.7	
4	TT4	25	2.2	
5	TT5	20	1.8	
6	TT6	18	1.6	
7	TT7	16	1.4	
8	TT8	15	1.3	
9	TT9	10	0.9	

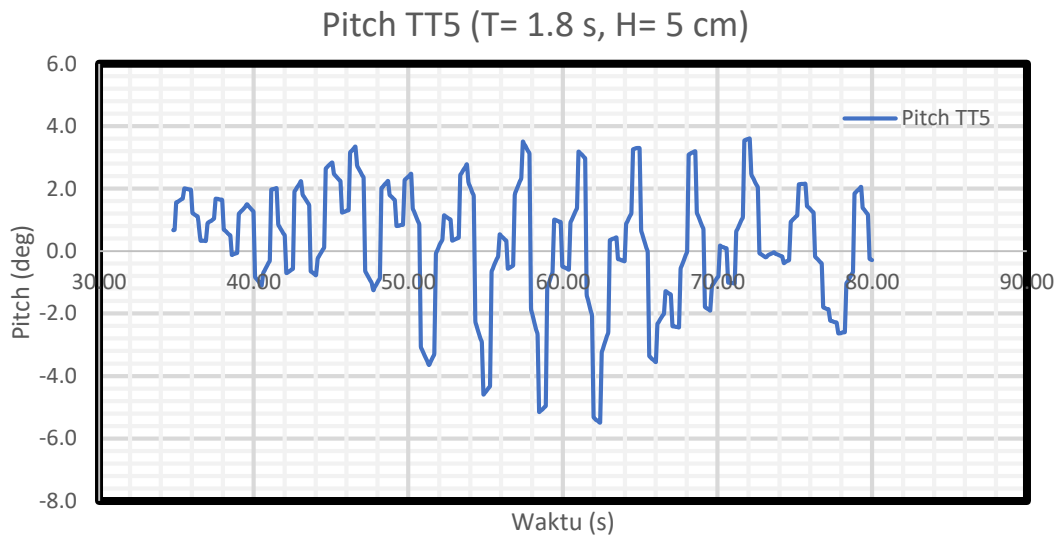


**Gambar 4.67.** *Time history instrumen image processing* untuk gerakan heave tertambat.



**Gambar 4.68.** *Time history instrumen image processing* untuk gerakan surge tertambat.





**Gambar 4.69.** *Time History* instrumen *gyroscope* untuk gerakan *pitch* tertambat.

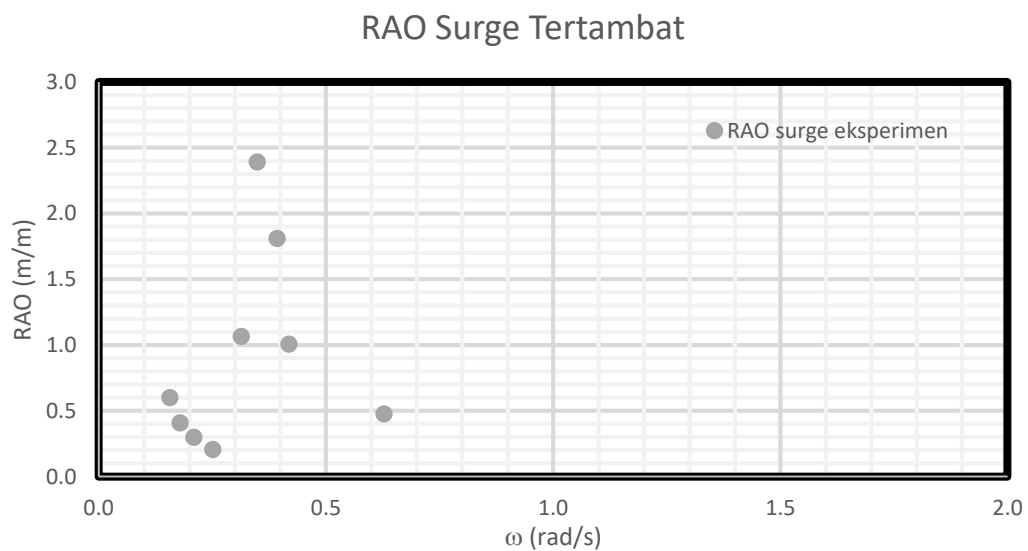
#### 4.6.4.1. Mode Gerak *Surge*

Setiap *time history* pada gerak *surge* dianalisa tinggi respon dan periode respon dari gerak yang terjadi. Analisa dilakukan dengan merata-rata respon yang terjadi untuk melihat respon gerak setiap variasi periode. RAO merupakan perbandingan antara amplitudo respon gerak dengan amplitudo gelombang. Periode respon dibandingkan dengan periode gelombang datang. Tabel 4.56 menunjukkan hasil eksperimen yang dilakukan pada mode gerak *surge*.

**Tabel 4.48.** Respon gerak dan RAO gerakan *surge* hasil eksperimen kondisi tertambat.

No.	KODE	Respon Gerak (cm)	Respon Periode (s)	RAO (cm/cm)	Perbandingan Periode
1	TT1	1.49	3.33	0.60	1.08
2	TT2	1.02	3.33	0.41	1.07
3	TT3	0.75	2.86	0.30	1.06
4	TT4	0.52	2.22	0.21	1.01
5	TT5	2.66	2.00	1.07	1.11
6	TT6	5.98	1.67	2.39	1.04
7	TT7	4.53	1.43	1.81	1.02
8	TT8	2.52	1.25	1.01	1.04
9	TT9	1.19	0.83	0.48	1.08

Kolom RAO pada Tabel 4.48 dapat di-*plot* untuk membuat suatu grafik RAO dari gerak *surge* model tertambat yang disajikan pada Gambar 4.70. RAO tertinggi dari *surge* tertambat secara eksperimen sebesar 2.390 m/m pada frekuensi 0.35 rad/s.



**Gambar 4.70.** Grafik RAO *surge* tertambat eksperimen.

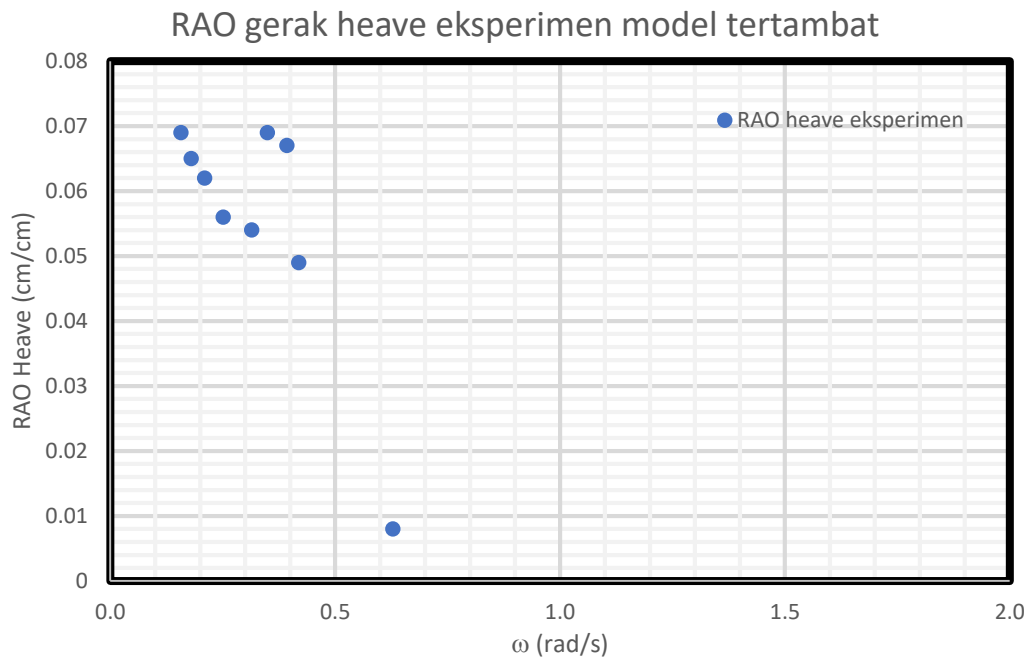
#### 4.6.4.2. Mode Gerak *Heave*

Setiap *time history* pada gerak *heave* dianalisa tinggi respon dan periode respon dari gerak yang terjadi. Analisa dilakukan dengan merata-rata respon yang terjadi untuk melihat respon gerak setiap variasi periode. RAO merupakan perbandingan antara amplitudo respon gerak dengan amplitudo gelombang. tabel 4.49 menunjukkan respon gerak dan periode respon struktur dari setiap gerakan beserta RAO model dalam kondisi tertambat dan perbandingan periode respon dan periode gelombang.

Kolom RAO pada tabel 4.49 dapat di-*plot* untuk membuat suatu grafik RAO dari gerak *surge* model tertambat yang disajikan pada gambar 4.71. RAO tertinggi dari *heave* tertambat secara eksperimen sebesar 0.069 m/m pada frekuensi 0.16 rad/s.

**Tabel 4.49.** Respon gerak dan RAO gerakan *heave* hasil eksperimen kondisi tertambat.

No.	KODE	Respon Gerak (cm)	Respon Periode (s)	RAO (cm/cm)	Perbandingan Periode
1	TT1	0,348	3,75	0,069	1,04
2	TT2	0,163	3,38	0,065	1,09
3	TT3	0,154	2,86	0,062	1,06
4	TT4	0,142	2,19	0,056	1,00
5	TT5	0,135	1,79	0,054	1,00
6	TT6	0,174	1,59	0,069	1,00
7	TT7	0,168	1,58	0,067	1,13
8	TT8	0,123	1,48	0,049	1,14
9	TT9	0,019	0,83	0,008	1,084



**Gambar 4.71.** Grafik RAO *heave* tertambat eksperimen.

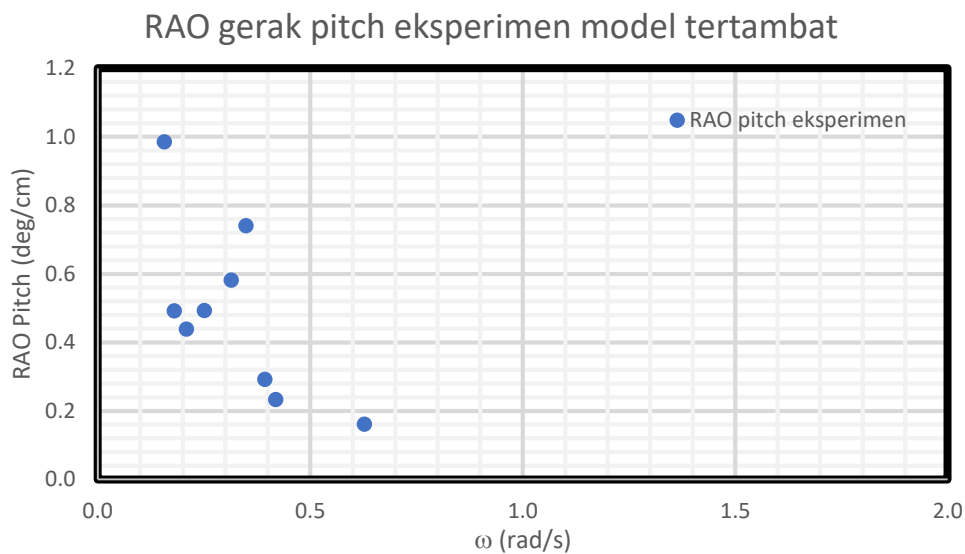
#### 4.6.4.3. Mode Gerak *Pitch*

Setiap *time history* pada gerak *pitch* dianalisa tinggi respon dan periode respon dari gerak yang terjadi. Analisa dilakukan dengan merata-rata respon yang terjadi untuk melihat respon gerak setiap variasi periode. RAO merupakan perbandingan antara amplitudo respon gerak dengan amplitudo gelombang. Tabel 4.50 menunjukkan respon gerak dan periode respon struktur dari setiap gerakan beserta RAO model dalam kondisi tertambat dan perbandingan periode respon dan periode gelombang.

Kolom RAO pada tabel 4.50 dapat di-*plot* untuk membuat suatu grafik RAO dari gerak *surge* model tertambat yang disajikan pada gambar 4.72. RAO tertinggi dari *pitch* tertambat secara eksperimen sebesar 0.985 deg/m pada frekuensi 0.16 rad/s, namun di frekuensi 0.35 rad/s juga terdapat RAO cukup tinggi sebesar 0.740.

**Tabel 4.50.** Respon gerak dan RAO gerakan *pitch* hasil eksperimen.

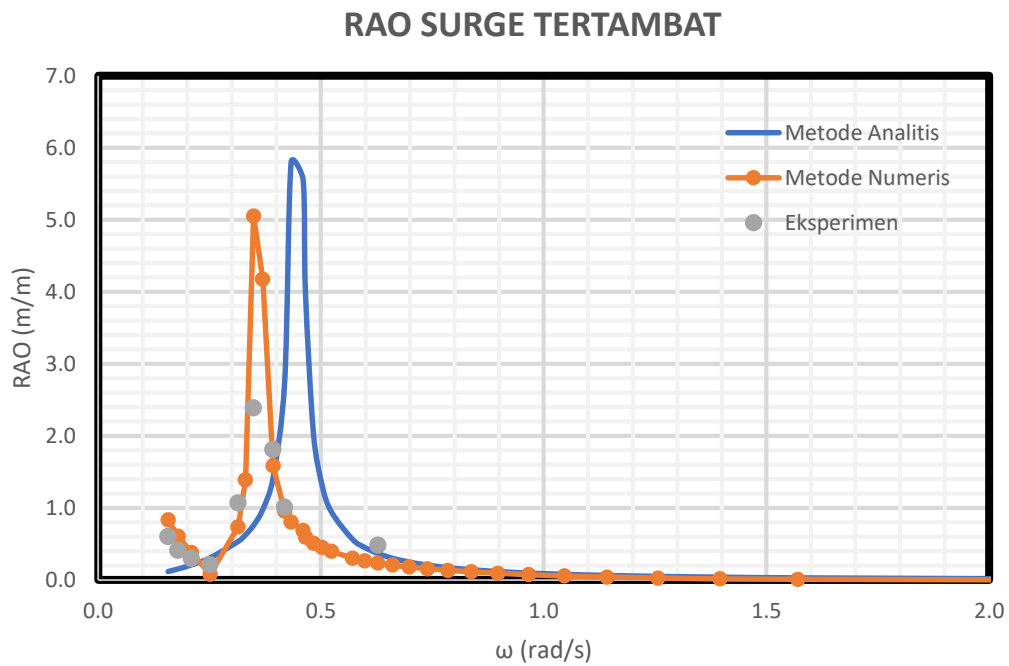
No.	KODE	Respon Gerak (cm)	Respon Periode (s)	RAO (deg/cm)	Perbandingan Periode
1	TT1	2,464	3,88	0,985	1,08
2	TT2	1,231	3,88	0,492	1,25
3	TT3	1,096	2,74	0,438	1,01
4	TT4	1,233	2,33	0,493	1,06
5	TT5	1,452	1,86	0,581	1,03
6	TT6	1,851	1,66	0,74	1,04
7	TT7	0,73	1,45	0,292	1,04
8	TT8	0,582	1,33	0,233	1,02
9	TT9	0,403	0,93	0,161	1,03



**Gambar 4.72.** Grafik RAO *pitch* tertambat eksperimen.

#### 4.6.5. Perbandingan RAO Tertambat Metode Analitis, Numeris dan Eksperimen

Gambar 4.73, 4.74 dan 4.75 menunjukkan perbandingan RAO terapan bebas pada arah datang gelombang 0 derajat dengan metode analitis, numeris dan eksperimen untuk tiap gerakan *surge*, *heave* dan *pitch* yang terjadi.

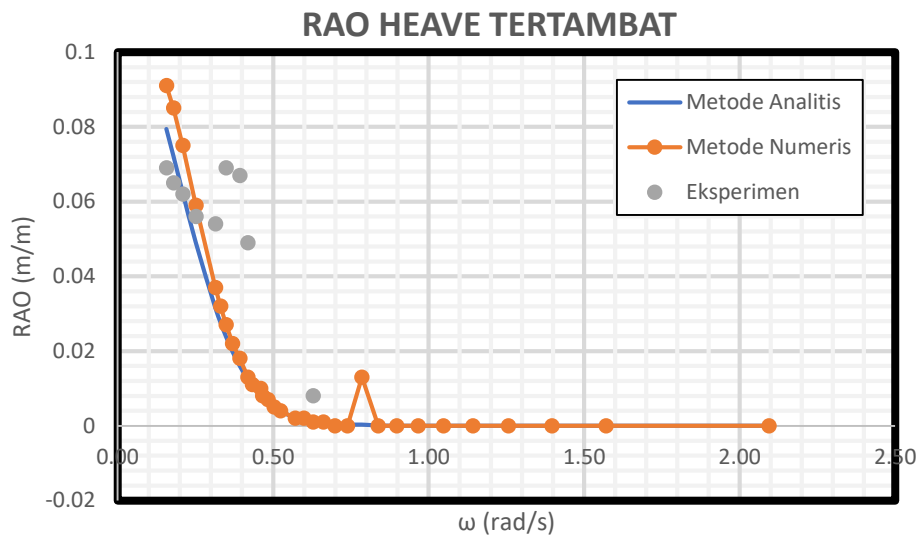


**Gambar 4.73.** Perbandingan RAO *surge* tertambat metode analitis, metode numeris dan eksperimen.

Tabel 4.51 menunjukkan perbandingan RAO *surge* dari setiap metode perhitungan yang dilakukan. Metode numeris dan metode eksperimen menunjukkan posisi frekuensi natural yang sama, 0.35 rad/s. RAO terbesar terjadi di perhitungan analitis sebesar 5.796 m/m.

**Tabel 4.51.** Perbandingan RAO *surge* tertambat.

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
Analitis	0.433	5.796
Numeris	0.349	5.053
Eksperimen	0.349	2.390

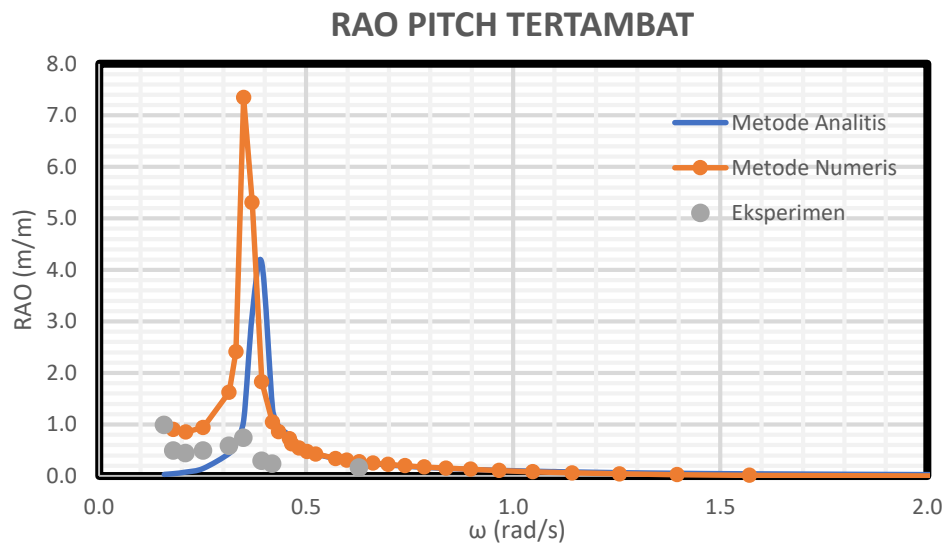


**Gambar 4.74.** Perbandingan RAO *heave* tertambat secara analitis, numeris dan eksperimen.

Gerak *heave* tertambat terbesar dari setiap metode analisa ditampilkan dalam tabel 4.52. Metode analitis menghasilkan nilai RAO paling tinggi dengan frekuensi di 0.16 rad/s. 3 metode memiliki nilai RAO terbesar di frekuensi yang sama, dengan RAO *surge* analitis sebesar 0.083 m/m numeris sebesar 0.091 m/m dan eksperimen sebesar 0.069 m/m.

**Tabel 4.52.** Perbandingan RAO *heave* tertambat.

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
Analitis	0.157	0.079
Numeris	0.157	0.091
Eksperimen	0.157	0.069



**Gambar 4.75.** Perbandingan RAO *pitch* tertambat secara analitis, numeris dan eksperimen.

Gerak *pitch* terbesar dari setiap metode analisa ditampilkan dalam tabel 4.53. Metode numeris menghasilkan nilai RAO paling tinggi sebesar 7.344 deg/m dengan frekuensi di 0.35 rad/s Metode numeris dan eksperimen memiliki nilai RAO terbesar di frekuensi yang sama di 0.35 rad/s , dengan RAO *pitch* analitis sebesar 4.138 deg/m dan eksperimen sebesar 0.740 deg/m.

**Tabel 4.53.** Perbandingan RAO *pitch* tertambat.

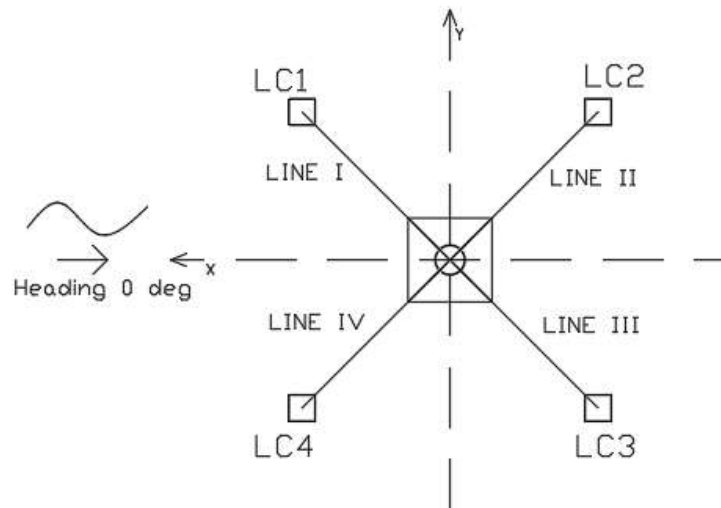
Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (deg/m)
Analitis	0.392	4.138
Numeris	0.349	7.344
Eksperimen	0.349	0.740

#### 4.7. TEGANGAN TALI

Tali tambat pada struktur akan mengalami gaya tarik yang besarnya berosilasi sesuai dengan gaya gelombang yang terjadi. Besar gaya tegangan tali yang terjadi diukur dengan menggunakan dua metode yaitu metode numeris dan metode eksperimen. Tegangan tali yang diukur menggunakan metode numeris dilakukan dengan bantuan perangkat lunak MOSES EDITOR 7, sedangkan untuk metode eksperimen tegangan tali diukur menggunakan instrumen *load*



*cell* yang mampu mencatat gaya tarik yang terjadi pada tali tambat. Properties tali tambat yang digunakan mengacu pada Tabel 4.18. Gambar 4.76 merupakan posisi tali tambat yang digunakan pada model baik untuk metode numeris maupun metode eksperimen. Gambar 4.77 merupakan *load cell* yang berada di dasar air kolam uji Laboratorium Hidrodinamika ITS.



**Gambar 4.76.** Posisi *Line I, II, III dan IV*.



**Gambar 4.77.** Kondisi *Load Cell* dalam air

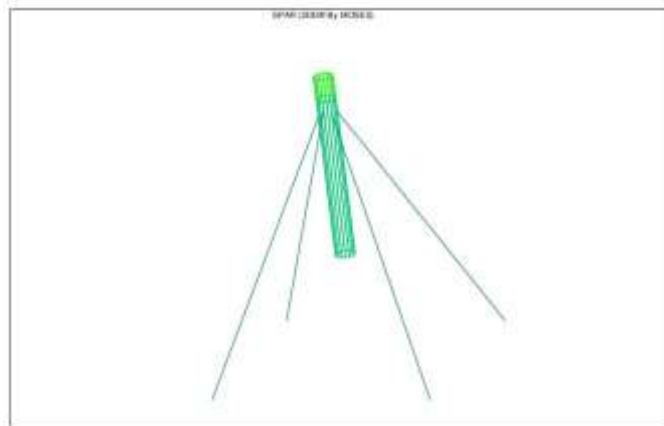
#### 4.7.1. Metode Numeris

Tegangan tali yang terjadi pada struktur dianalisa menggunakan bantuan perangkat lunak MOSES EDITOR 7. Properties tali tambat yang ada pada gambar 4.8 dan tabel 4.18 dimasukkan pada program MOSES EDITOR

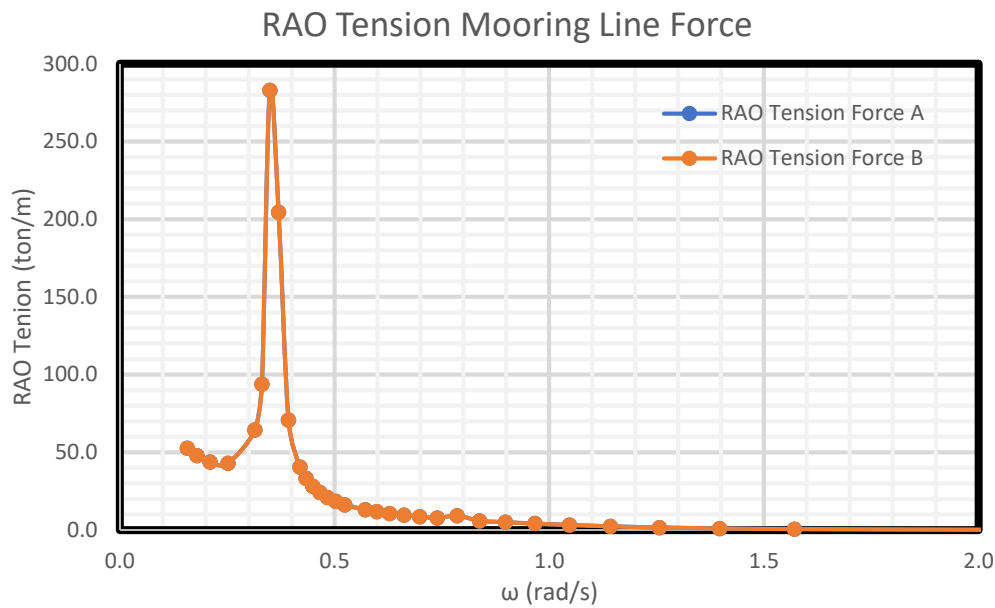
sehingga dihasilkan respon tegangan tali yang terjadi dalam bentuk RAO *Tension Force Mooring Line*. Gambar 4.78 berikut ini merupakan permodelan dari tali tambat yang digunakan pada model dengan menggunakan MOSES EDITOR. Gambar 4.79 dan 4.80 menunjukkan grafik hasil RAO *Tension Force* dari tiap tali tambat yang digunakan. Dari grafik dapat dilihat bahwa *Tension Force* yang terjadi pada tali tambat I dan tali tambat IV besarnya sama, sedangkan tali tambat II besarnya sama dengan tali tambat III namun lebih kecil dari tali tambat I dan IV. Tabel 4.54 menunjukkan tegangan maksimum pada tiap tali tambat dari hasil MOSES EDITOR.

**Tabel 4.54.** *Tension Force* maksimum tiap tali tambat pada MOSES.

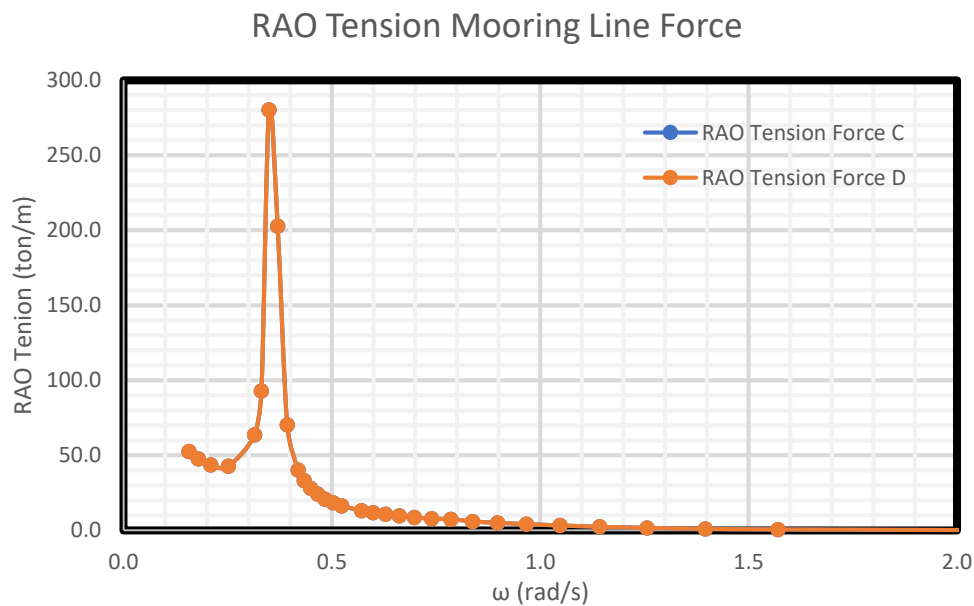
	Frequency (rad/s)	Tension Force (ton)
<b>Mooring Line 1</b>	0.349	282.87
<b>Mooring Line 2</b>	0.349	280.17
<b>Mooring Line 3</b>	0.349	280.17
<b>Mooring Line 4</b>	0.349	282.87



**Gambar 4.78.** Permodelan tali tambat dengan menggunakan MOSES EDITOR.



**Gambar 4.79.** RAO Tension tali tambat I dan IV metode numerik.

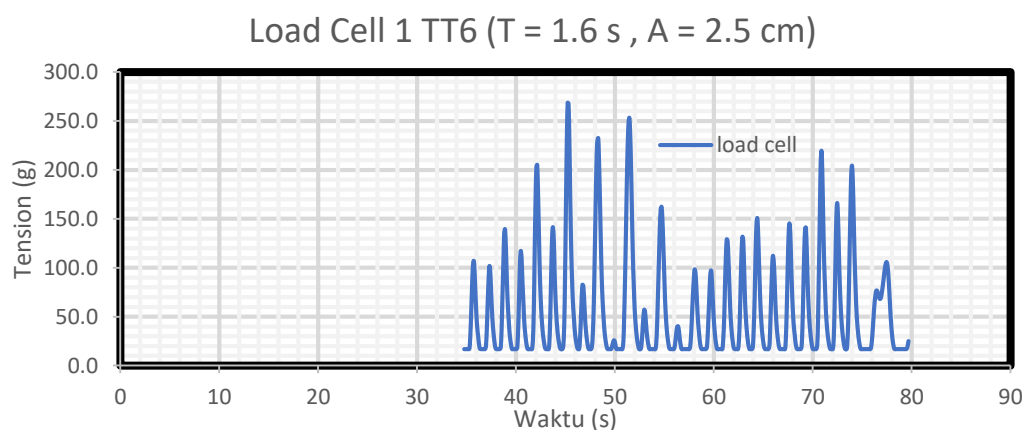


**Gambar 4.80.** RAO Tension tali tambat II dan III metode numerik.

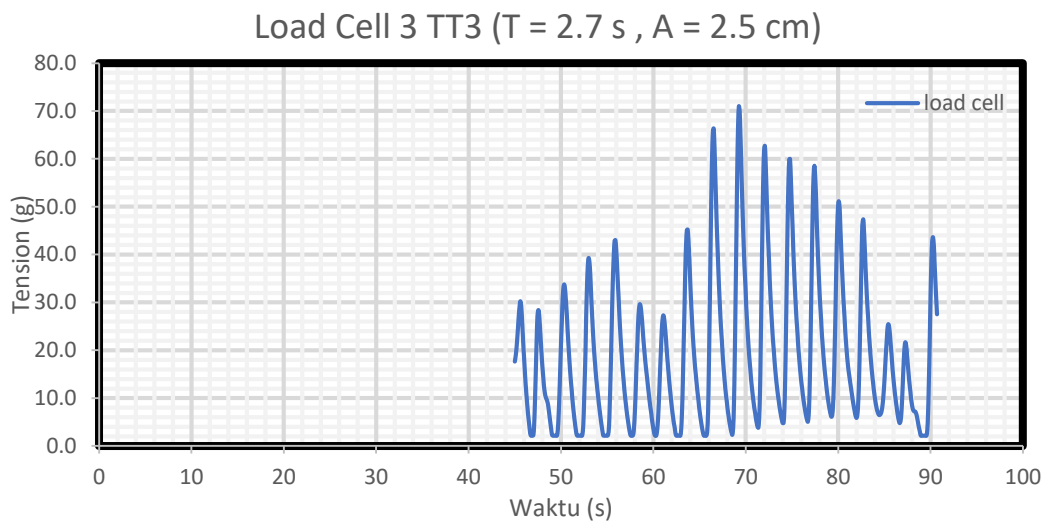
#### 4.7.2. Metode Eksperimen

Analisa eksperimen dilakukan di Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS. Model fisik diletakkan di kolam dengan dimensi panjang 100 m, kedalamann 1.8 m dan lebar 3 m. Pada kondisi tertambat model fisik diletakkan dengan konfigurasi seperti pada Gambar 4.76 dengan menggunakan empat buah tali tambat. Load Cell dengan kapasitas beban

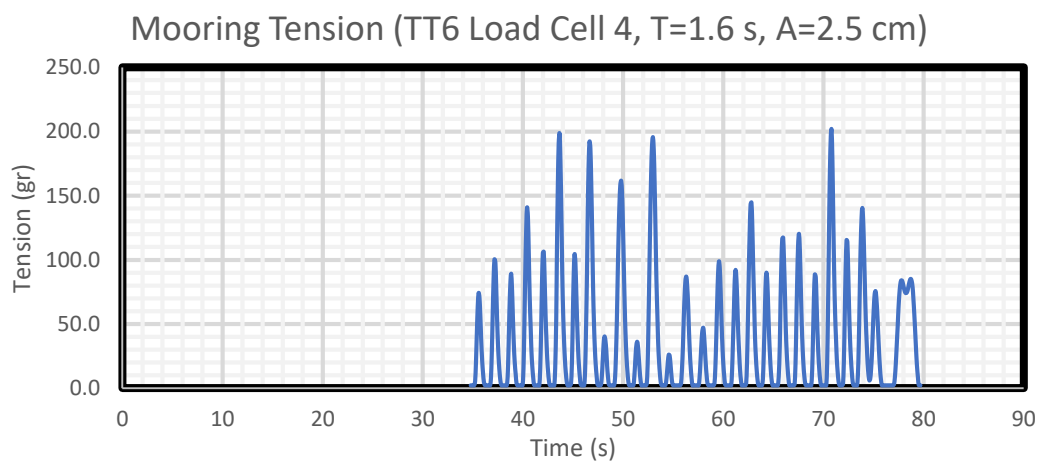
tarik 5 kg digunakan pada tiap tali tambat yang dipasang pada model fisik. Model fisik akan diberi beban gelombang dengan arah 0 derajat yang berasal dari *wave maker* dan diberi beban 9 gelombang dengan karakteristik seperti pada tabel 4.52. Variasi gelombang yang terjadi adalah variasi periode gelombang, sedangkan besar tinggi gelombang konstan. Respon tegangan tali tambat yang terjadi akibat beban gelombang akan dicatat dengan instrumen *load cell*. Gambar 4.81, 4.82, 4.83 merupakan salah satu contoh dari *time history* hasil dari instrumen *load cell*. Akan tetapi, pada tali tambat 2 *load cell* mengalami kerusakan sehingga menghasilkan data yang tidak akurat dan tidak dapat digunakan. Namun, hal ini tidak menjadi masalah karena tali tambat 2 dan tali tambat 3 yang letaknya simetri akan menghasilkan respon tegangan yang sama sehingga dapat diwakilkan dengan menggunakan hasil data pada *load cell* tali tambat 3.



**Gambar 4.81.** *Time history* instrumen *load cell* tali tambat 1.



**Gambar 4.82.** *Time History* instrumen *load cell* tali tambat 3.



**Gambar 4.83.** *Time history* instrumen *load cell* tali tambat 4.

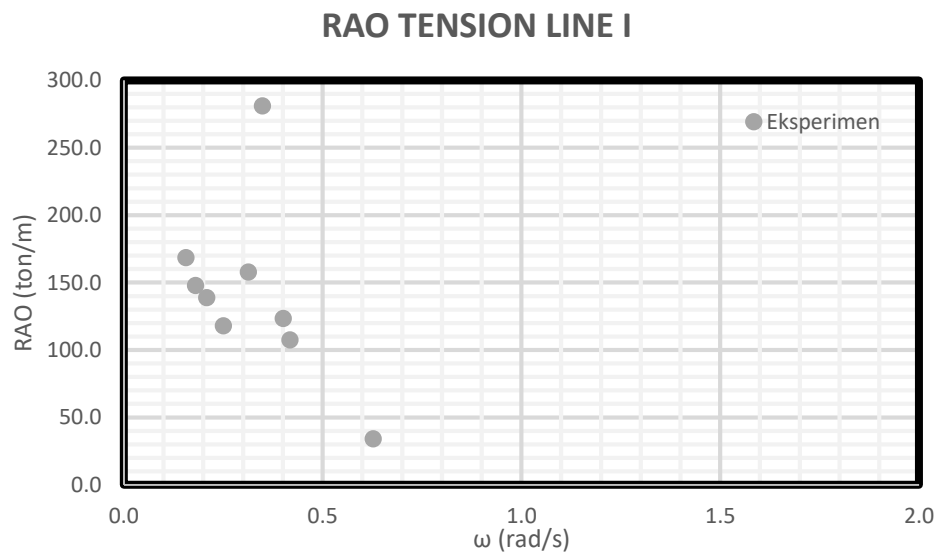
#### 4.7.2.1. Load Cell 1

Setiap *time history* pada tension tali tambat *load cell* 1 dianalisa tinggi respon dan periode respon dengan merata-rata dari tegangan yang terjadi. RAO tegangan merupakan perbandingan amplitudo respon tension tali tambat dengan amplitudo gelombang. Tabel 4.55 menunjukkan respon tegangan tali tambat dan periode respon tali tambat dari setiap gerakan beserta RAO *tension force* tali tambat dan perbandingan periode respon dengan periode gelombang.

**Tabel 4.55.** Data *load cell* 1 hasil eksperimen.

No.	KODE	Respon Tension (gr)	Respon Periode (s)	RAO Tension (ton/m)	Perbandingan Periode
1	TT1	27,456	3,88	168,34	1,08
2	TT2	24,08	3,32	147,64	1,07
3	TT3	22,607	2,91	138,61	1,08
4	TT4	19,226	2,33	117,88	1,06
5	TT5	25,727	1,86	157,74	1,03
6	TT6	45,808	1,52	280,86	1,05
7	TT7	20,12	1,37	123,36	0,98
8	TT8	17,501	1,42	107,30	1,09
9	TT9	5,527	0,85	33,89	1,05

Kolom RAO pada tabel 4.55 dapat di-*plot* untuk membuat suatu grafik RAO dari tegangan tali tambat *Line I* yang disajikan pada Gambar 4.84.



**Gambar 4.84.** Grafik RAO tegangan tali tambat *load cell* 1 hasil eksperimen.

#### 4.7.2.2. Load Cell 2

*Load Cell* 2 yang terpasang pada jangkar mengalami kerusakan saat pengambilan data, sehingga tidak terdapat data yang dapat dianalisa.

Namun, representasi *load cell* 2 dapat diwakilkan oleh *load cell* 3, karena konfigurasi yang simetris.

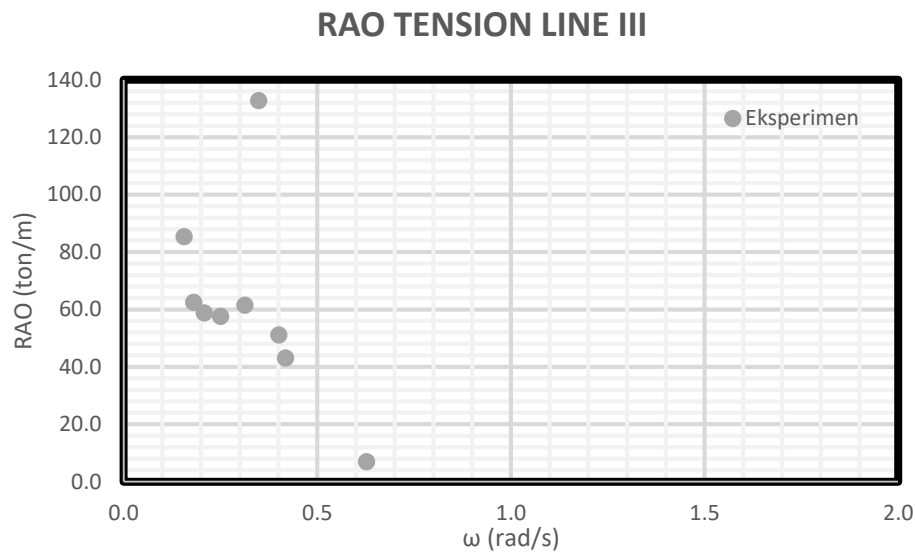
#### 4.7.2.3. Load Cell 3

Setiap *time history* pada tension tali tambat *load cell* 3 dianalisa tinggi respon dan periode respon dari tegangan yang terjadi. RAO *tension force* merupakan perbandingan antara amplitudo respon tension tali tambat dengan amplitudo gelombang. Tabel 4.56 menunjukkan respon tegangan tali tambat dan periode respon tali tambat dari setiap gerakan beserta RAO *tension force* tali tambat dan perbandingan periode respon dengan periode gelombang.

**Tabel 4.56.** Data *load cell* 3 hasil eksperimen.

No.	KODE	Respon Tension (gr)	Respon Periode (s)	RAO Tension (ton/m)	Perbandingan Periode
1	TT1	13,91	3,88	85,287	1,08
2	TT2	10,179	3,56	62,409	1,15
3	TT3	9,574	2,91	58,702	1,08
4	TT4	9,379	2,33	57,502	1,06
5	TT5	10,02	1,86	61,44	1,03
6	TT6	21,633	1,52	132,636	1,05
7	TT7	8,322	1,55	51,026	1,11
8	TT8	7,017	1,42	43,025	1,09
9	TT9	1,129	0,85	6,92	1,05

Kolom RAO pada tabel 4.56 dapat di-*plot* untuk membuat suatu grafik RAO dari tegangan tali tambat 3 yang disajikan pada gambar 4.85.



**Gambar 4.85.** Grafik RAO tegangan tali tambat *load cell* 3 hasil eksperimen.

#### 4.7.2.4. Load Cell 4

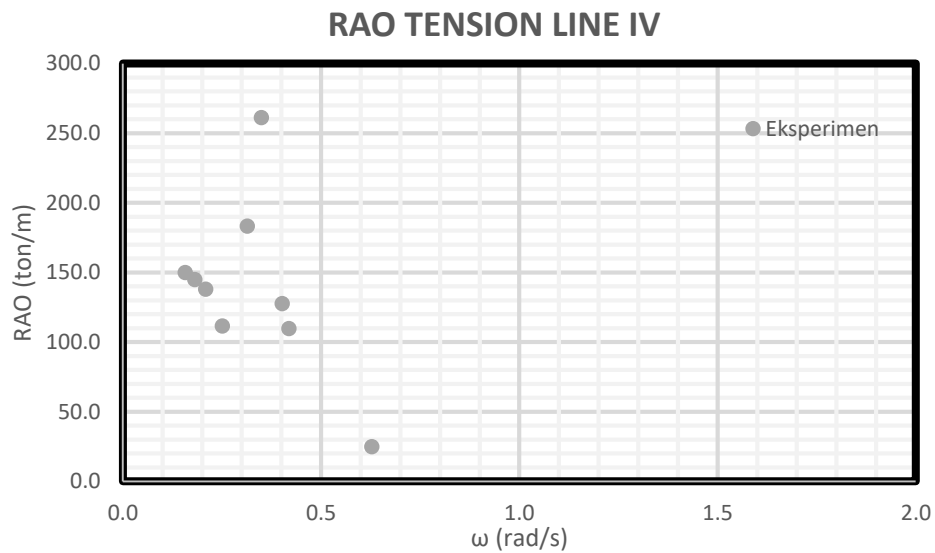
Setiap *time history* pada tegangan tali tambat *load cell* 4 dianalisa tinggi respon dan periode respon dengan merata-rata dari tegangan yang terjadi. *RAO tension force* merupakan perbandingan antara amplitudo respon tegangan tali tambat dengan amplitudo gelombang. Tabel 4.57 menunjukkan respon tegangan tali tambat dan periode respon tali tambat dari setiap gerakan beserta *RAO tension force* tali tambat dan perbandingan periode respon dengan periode gelombang.



**Tabel 4.57.** Respon tegangan dan RAO tegangan tali tambat *load cell* 4 hasil eksperimen.

No.	KODE	Respon Tension (gr)	Respon Periode (s)	RAO Tension (ton/m)	Perbandingan Periode
1	TT1	24,45	3,88	149,91	1,08
2	TT2	23,598	3,05	144,683	0,98
3	TT3	22,491	2,91	137,901	1,08
4	TT4	18,181	2,33	111,472	1,06
5	TT5	29,88	1,86	183,199	1,03
6	TT6	42,584	1,52	261,090	1,05
7	TT7	20,817	1,45	127,634	1,04
8	TT8	17,869	1,42	109,558	1,09
9	TT9	4,043	0,85	24,791	1,05

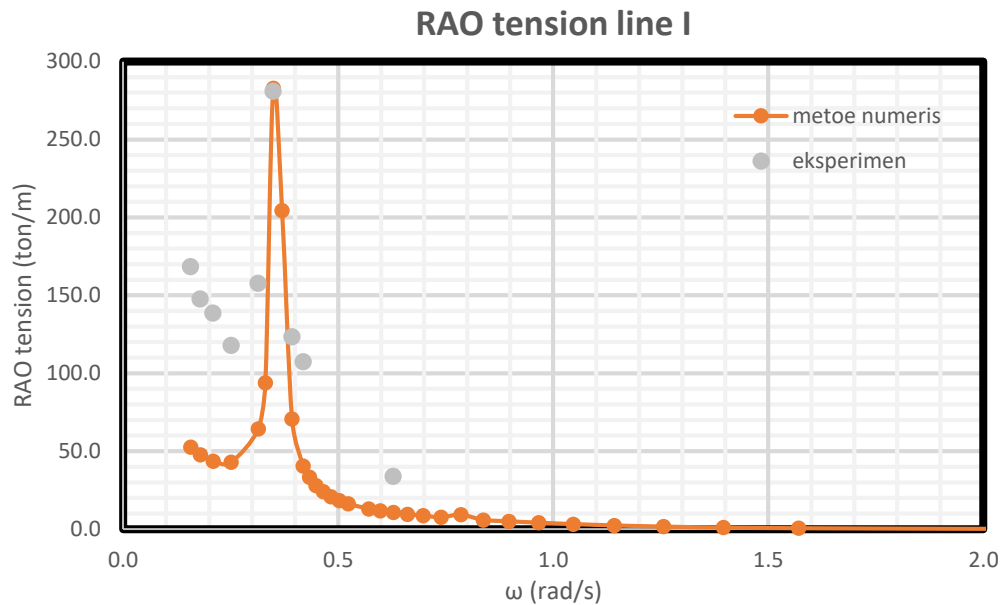
Kolom RAO pada Tabel 4.57 dapat di-*plot* untuk membuat suatu grafik RAO dari tegangan tali tambat 4 yang disajikan pada gambar 4.86.



**Gambar 4.86.** Grafik RAO tegangan tali tambat *load cell* 4 hasil eksperimen.

#### 4.7.3. Perbandingan RAO Tegangan Tertambat Metode Analitis, Numeris dan Eksperimen

Gambar 4.87-4.90 menunjukkan perbandingan RAO Tali Tambat dari metode numerik dan metode eksperimen dari setiap *line* dengan arah gelombang 0 derajat.

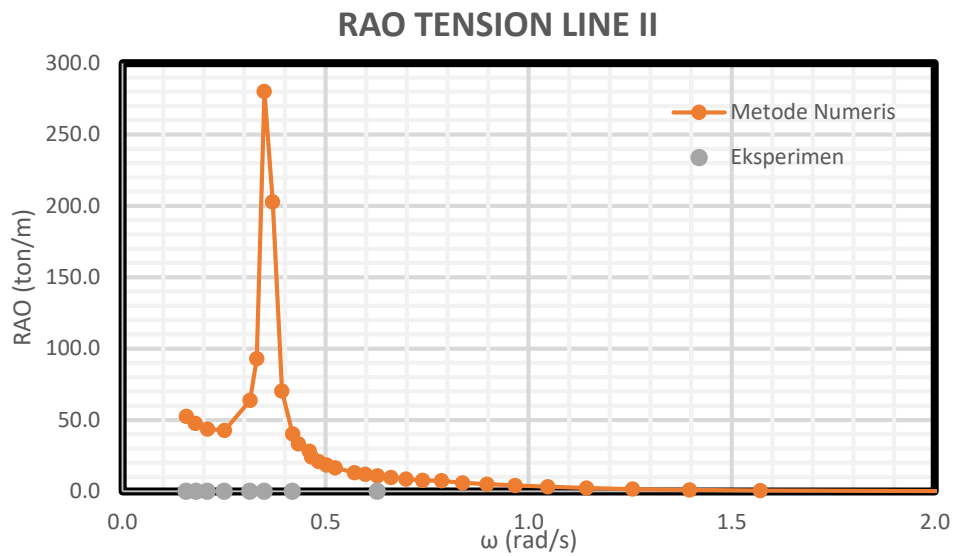


**Gambar 4.87.** Perbandingan RAO *Tension line I* tertambat metode numeris dan eksperimen.

Tegangan tali pada *Line I* dengan metode numerik dan eksperimen ditampilkan pada Tabel 4.58. Metode numeris menghasilkan RAO yang lebih besar (282.86 ton) daripada RAO eksperimen (280.863 ton). Namun, keduanya berada di frekuensi yang sama yaitu 0.349 rad/s.

**Tabel 4.58.** Perbandingan *Tension Line I*.

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (ton/m)
Numeris	0.349	282.860
Eksperimen	0.349	280.863

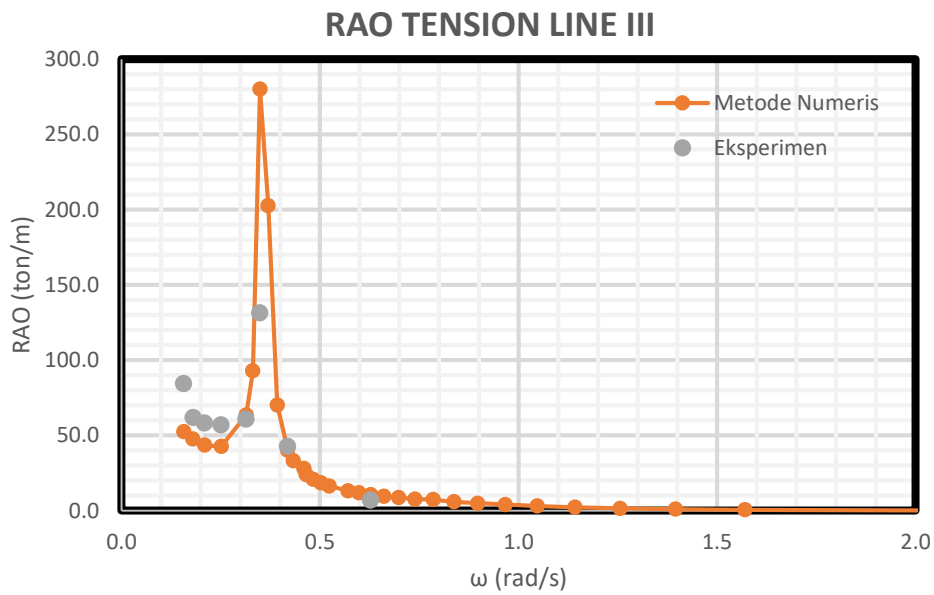


**Gambar 4.88.** Perbandingan RAO *Tension line* II tertambat metode numeris dan eksperimen.

Tegangan tali pada *Line* II dengan metode numerik dan eksperimen ditampilkan pada tabel 4.59. Pada *Line* II, *load cell* mengalami kerusakan sehingga tidak ada data yang dapat dianalisa. Metode numeris menghasilkan RAO sebesar 280.180 ton di frekuensi yang sama yaitu 0.349 rad/s.

**Tabel 4.59.** Perbandingan *Tension Line* II.

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (ton/m)
Numeris	0.349	280.180
Eksperimen	-	-

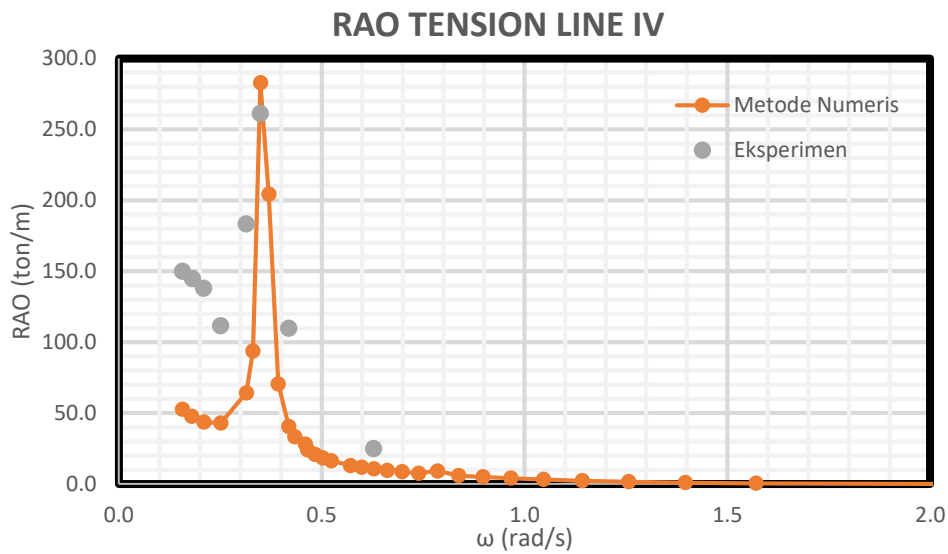


**Gambar 4.89.** Perbandingan RAO *Tension line* III tertambat metode numeris dan eksperimen.

Tegangan tali pada *Line* III dengan metode numerik dan eksperimen ditampilkan pada Tabel 4.60. Metode numeris menghasilkan RAO yang lebih besar (280.170 ton) daripada RAO eksperimen (132.636 ton). Namun, keduanya berada di frekuensi yang sama yaitu 0.349 rad/s.

**Tabel 4.60.** Perbandingan *Tension Line* III.

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (ton/m)
Numeris	0.349	280.170
Eksperimen	0.349	132.636



**Gambar 4.90.** Perbandingan RAO *Tension line IV* tertambat metode numeris dan eksperimen.

Tegangan tali pada *Line IV* dengan metode numerik dan eksperimen ditampilkan pada Tabel 4.61. Metode numeris menghasilkan RAO yang lebih besar (280.86 ton) daripada RAO eksperimen (261.090 ton). Namun, keduanya berada di frekuensi yang sama yaitu 0.349 rad/s.

**Tabel 4.61.** Perbandingan *Tension Line IV*.

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (ton/m)
Numeris	0.349	282.860
Eksperimen	0.349	261.090

## 4.8. STUDI PARAMETRIK (VARIASI POSISI *FAIRLEAD*)

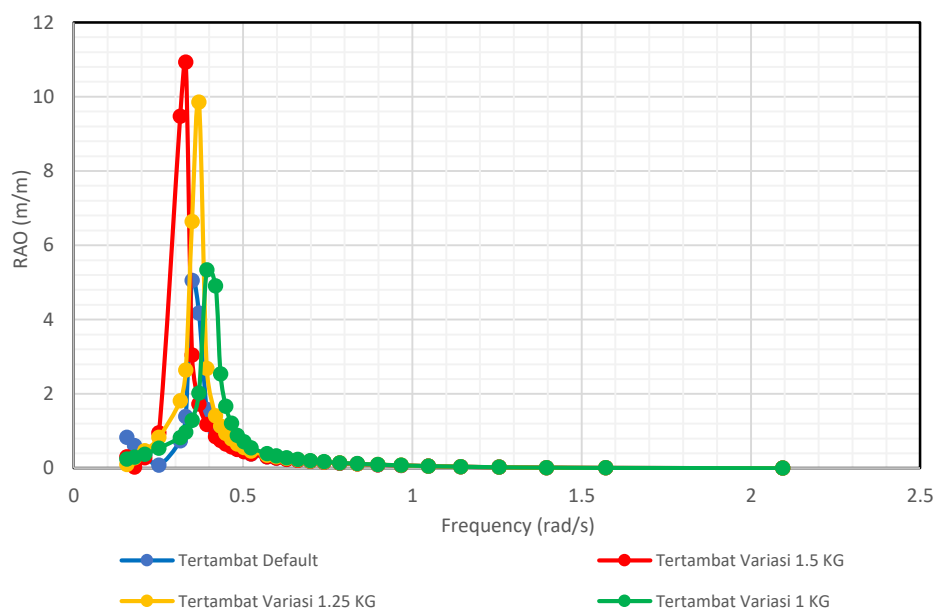
### 4.8.1. Respon Gerak

#### 4.8.1.1. *Response Amplitude Operator Gerak Surge*

Respon gerak *surge* pada variasi *fairlead* menunjukkan jika posisi *fairlead* semakin mendekati titik pusat massa dari model SPAR maka frekuensi terjadinya RAO terbesar bergeser menuju frekuensi yang lebih tinggi tetapi respon gerak semakin menurun. Hal itu dikarenakan panjang tali tambat terus mengecil sehingga membuat kekakuan *mooring* bertambah dan mengakibatkan frekuensi semakin bergeser ke frekuensi yang lebih tinggi. Hasil RAO *surge* terbesar pada setiap variasi posisi *fairlead* ditunjukkan oleh tabel 4.62. Grafik perbandingan RAO *surge* maksimum di setiap variasi ditunjukkan oleh gambar 4.91.

**Tabel 4.62.** Perbandingan RAO *surge* terbesar di setiap variasi posisi *fairlead*.

Variasi <i>Fairlead</i>	RAO Terbesar (m/m)	Frekuensi (rad/s)
1.50 VCG	10.928	0.3307
1.25 VCG	9.853	0.3696
1.00 VCG	5.341	0.3927



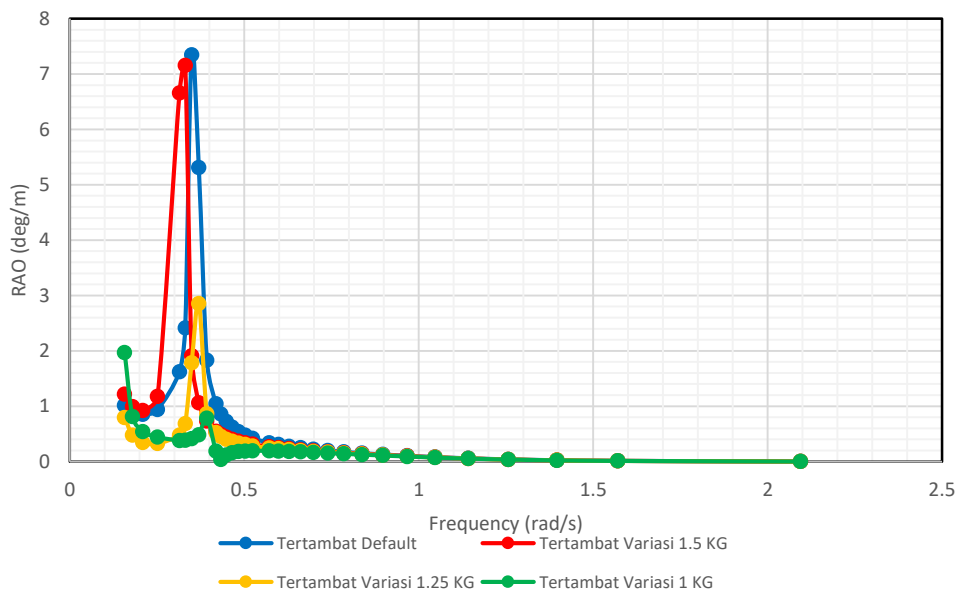
**Gambar 4.91.** Perbandingan hasil RAO gerak *surge* model SPAR kondisi tertambat dengan variasi posisi *fairlead* secara numerik.

#### 4.8.1.2. Response Amplitude Operator Gerak Pitch

Respon gerak *pitch* yang terjadi pada studi parametrik variasi posisi *fairlead* menunjukkan jika posisi *fairlead* semakin mendekati titik pusat massa dari model SPAR maka frekuensi terjadinya respon gerak *pitch* terbesar semakin bergeser menuju frekuensi tinggi tetapi respon gerak terus menurun. Hal itu disebabkan karena kekakuan tali tambat yang terus menurun seiring dengan berkurangnya panjang tali tambat sehingga frekuensi bergeser ke frekuensi tinggi. Hasil RAO *pitch* terbesar di setiap variasi ditunjukkan oleh tabel 4.71. Grafik perbandingan RAO *pitch* terbesar di setiap variasi ditunjukkan oleh gambar 4.92.

**Tabel 4.63.** Perbandingan RAO *pitch* terbesar di setiap variasi posisi *fairlead*.

Variasi Fairlead	RAO Terbesar (deg/m)	Frekuensi (rad/s)
1.50 VCG	7.154	0.3307
1.25 VCG	2.856	0.3696
1.00 VCG	0.785	0.3927



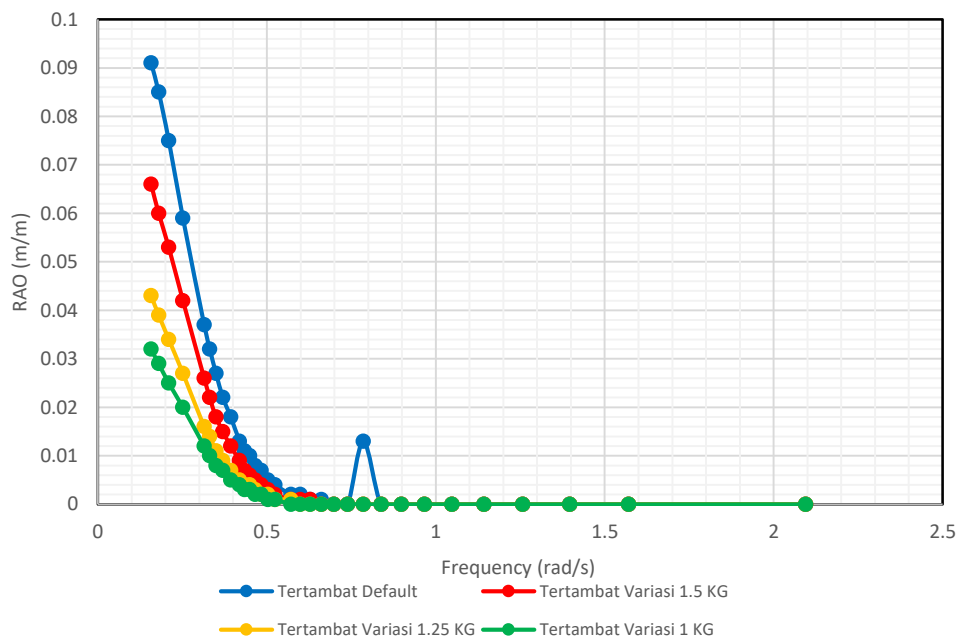
**Gambar 4.92.** Perbandingan hasil RAO gerak *pitch* model SPAR kondisi tertambat dengan variasi posisi *fairlead* secara numerik.

#### 4.8.1.3. Response Amplitude Operator Gerak Heave

Respon gerak *heave* yang terjadi pada variasi posisi *fairlead* menunjukkan hasil bahwa semakin dekat titik *fairlead* menuju titik pusat massa model SPAR maka respon gerak yang dihasilkan semakin mengecil. Hal itu terjadi pada frekuensi yang sama di setiap variasi nya. Hasil RAO *heave* terbesar di setiap variasi posisi *fairlead* ditunjukkan oleh tabel 4.64. Grafik perbandingan RAO *heave* di setiap variasi ditunjukkan oleh gambar 4.93.

**Tabel 4.64.** Perbandingan RAO *heave* terbesar di setiap variasi posisi *fairlead*.

Variasi <i>Fairlead</i>	RAO Terbesar (m/m)	Frekuensi (rad/s)
1.50 VCG	0.066	0.1571
1.25 VCG	0.043	0.1571
1.00 VCG	0.032	0.1571



**Gambar 4.93.** Perbandingan hasil RAO gerak *heave* model SPAR kondisi tertambat dengan variasi posisi *fairlead*.



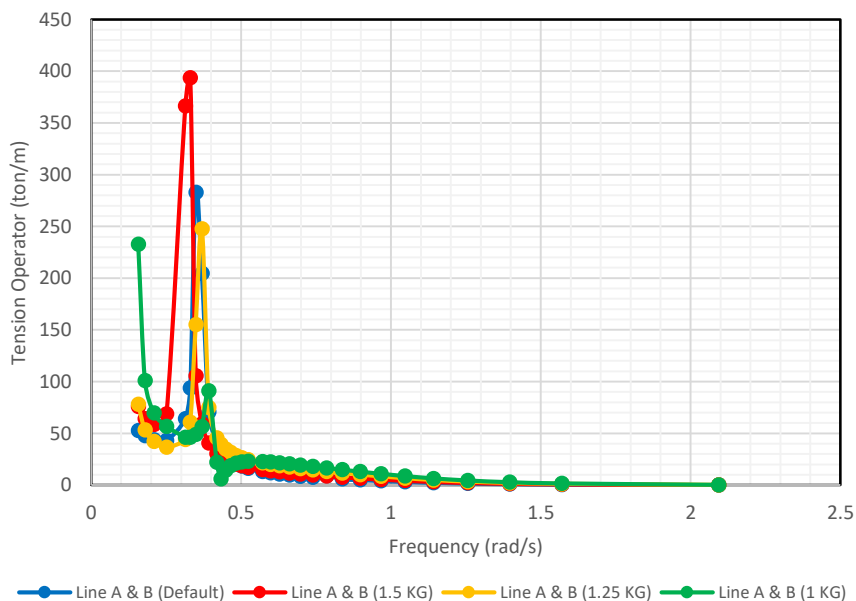
## 4.8.2. Tegangan Tali Tambat

### 4.8.2.1. Tegangan Tali Tambat *Line 1* dan 4

*Tension operator* yang terjadi pada *line 1* dan 4 menunjukkan bahwa semakin dekat titik *fairlead* dengan titik pusat massa model SPAR, maka semakin kecil *tension operator* yang terjadi. Selain itu, frekuensi terjadinya *tension operator* terbesar di setiap variasi nya semakin bergeser menuju frekuensi tinggi seiring dengan mendekatnya titik *fairlead* terhadap titik pusat massa model SPAR. Perbandingan *tension* maksimum *line 1* dan 4 di setiap variasi posisi *fairlead* ditunjukkan oleh tabel 4.65. Grafik perbandingan RAO *tension line 1* dan 4 di setiap variasi posisi *fairlead* ditunjukkan oleh gambar 4.94.

**Tabel 4.65.** Perbandingan RAO *tension* terbesar *line 1* dan 4 di setiap variasi posisi *fairlead*.

Variasi <i>Fairlead</i>	RAO Terbesar (ton/m)	Frekuensi (rad/s)
1.50 VCG	393.53	0.3307
1.25 VCG	247.45	0.3696
1.00 VCG	90.95	0.3927



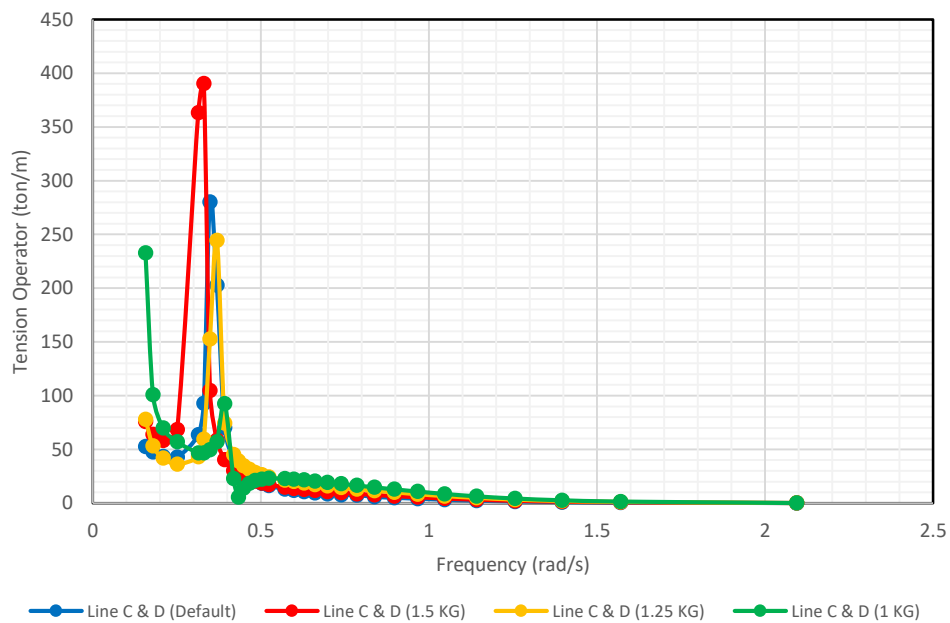
**Gambar 4.94.** Perbandingan hasil RAO *tension* tali tambat *line 1* dan 4 dengan variasi posisi *fairlead*.

#### 4.8.2.2. Tegangan Tali Tambat *Line 2* dan *3*

*Tension operator* yang dihasilkan pada setiap variasi posisi *fairlead* menunjukkan bahwa semakin dekat titik *fairlead* dengan titik pusat massa model SPAR, maka semakin kecil *tension operator* maksimum yang ditimbulkan. Selain itu, frekuensi tegangan maksimum semakin bergeser seiring dengan mendekatnya titik *fairlead* menuju titik pusat massa model SPAR. Perbandingan RAO *tension* maksimum di setiap variasi posisi *fairlead* ditunjukkan oleh tabel 4.66. Grafik perbandingan RAO *tension* di setiap variasi posisi *fairlead* ditunjukkan oleh gambar 4.95.

**Tabel 4.66.** Perbandingan RAO *tension line 2* dan *3* di setiap variasi posisi *fairlead*.

Variasi <i>Fairlead</i>	RAO Terbesar (ton/m)	Frekuensi (rad/s)
1.50 VCG	390.26	0.3307
1.25 VCG	244.57	0.3696
1.00 VCG	92.66	0.3927



**Gambar 4.95.** Perbandingan hasil RAO *tension* tali tambat *line 2* dan *3* dengan variasi posisi *fairlead*

**HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN**

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. KESIMPULAN

Kesimpulan yang didapatkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Gerakan heave model SPAR eksperimen dalam kondisi free floating mengalami resonansi pada periode gelombang eksperimen 2.2 detik (25 detik untuk periode gelombang asli) sesuai dengan analisa secara analitis dan numerik. Sedangkan, ketika model SPAR dalam keadaan tertambat gerak heave yang terjadi berkurang secara signifikan.
2. Gerakan surge model SPAR eksperimen dalam kondisi tertambat mengalami resonansi pada periode gelombang eksperimen 1.6 detik (18 detik untuk periode gelombang asli) sedangkan pada saat kondisi free floating tidak mengalami resonansi hal ini disebabkan tali tambat memberikan kekakuan terhadap gerak surge model sehingga gerak surge memiliki periode natural gerak.
3. Gerakan pitch model SPAR eksperimen dalam kondisi free floating berbeda dengan analisa secara analitis dan numerik karena adanya tali penahan drift yang digunakan pada saat eksperimen.
4. Tegangan tali tambat kondisi *default* yang ditinjau secara numerik dan eksperimen menghasilkan:
  - RAO *tension* maksimum pada tali tambat *line* 1 hasil pembacaan *load cell* pada eksperimen bernilai 280.863 ton/m pada frekuensi 0.349 rad/s. Hasil numerik bernilai 282.860 ton/m pada frekuensi 0.349 rad/s.
  - RAO *tension* maksimum pada tali tambat *line* 3 hasil pembacaan *load cell* pada eksperimen bernilai 132.636 ton/m pada frekuensi 0.349 rad/s. Hasil numerik bernilai 280.170 ton/m pada frekuensi 0.349 rad/s.
  - RAO *tension* maksimum pada tali tambat *line* 4 hasil pembacaan *load cell* pada eksperimen bernilai 261.090 ton/m pada frekuensi 0.349 rad/s. Hasil numerik bernilai 282.860 ton/m pada frekuensi 0.349 rad/s.
5. Respon gerak yang dihasilkan pada setiap variasi dengan pemodelan MOSES adalah sebagai berikut:

- Pada variasi posisi *fairlead* 1.5 VCG, RAO *surge* terbesar bernilai 10.928 m/m pada frekuensi 0.3307 rad/s. RAO *pitch* terbesar bernilai 7.154 deg/m pada frekuensi 0.3307 rad/s. RAO *heave* terbesar bernilai 0.066 m/m pada frekuensi 0.1571 rad/s.
  - Pada variasi posisi *fairlead* 1.25 VCG, RAO *surge* terbesar bernilai 9.853 m/m pada frekuensi 0.3696 rad/s. RAO *pitch* terbesar bernilai 2.856 deg/m pada frekuensi 0.3696 rad/s. RAO *heave* terbesar 0.043 m/m pada frekuensi 0.1571 rad/s.
  - Pada variasi posisi *fairlead* 1.0 VCG, RAO *surge* terbesar bernilai 5.341 m/m pada frekuensi 0.3927 rad/s. RAO *pitch* terbesar bernilai 0.785 deg/m pada frekuensi 0.3927 rad/s. RAO *heave* terbesar bernilai 0.032 m/m pada frekuensi 0.1571 rad/s.
  - Ketika titik *fairlead* semakin mendekati titik pusat massa model SPAR respon gerak semakin menurun dan frekuensi RAO terbesar semakin bergeser menuju frekuensi tinggi.
6. Tegangan tali tambat model SPAR dengan variasi posisi *fairlead* yang ditinjau secara numerik menghasilkan:
- Pada variasi posisi *fairlead* 1.5 VCG, RAO *tension* terbesar *line* 1 dan 4 (didefinisikan A & B pada MOSES) bernilai 393.53 ton/m pada frekuensi 0.3307 rad/s. RAO *tension* terbesar *line* 2 dan 3 (didefinisikan C & D pada MOSES) bernilai 390.26 ton/m pada frekuensi 0.3307 rad/s.
  - Pada variasi posisi *fairlead* 1.25 VCG, RAO *tension* terbesar *line* 1 dan 4 (didefinisikan A & B pada MOSES) bernilai 247.45 ton/m pada frekuensi 0.3696 rad/s. RAO *tension* terbesar *line* 2 dan 3 (didefinisikan C & D pada MOSES) bernilai 244.57 ton/m pada frekuensi 0.3696 rad/s.
  - Pada variasi posisi *fairlead* 1.0 VCG, RAO *tension* terbesar *line* 1 dan 4 (didefinisikan A & B pada MOSES) bernilai 90.95 ton/m pada frekuensi 0.3927 rad/s. RAO *tension* terbesar *line* 2 dan 3 (didefinisikan C & D pada MOSES) bernilai 92.66 ton/m pada frekuensi 0.3927 rad/s.
  - Ketika titik *fairlead* semakin mendekati titik pusat massa model SPAR respon tegangan tali tambat semakin menurun dan frekuensi RAO *tension* terbesar semakin bergeser menuju frekuensi tinggi.

## 5.2. SARAN

Saran yang dapat diberikan berdasarkan pengerjaan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan *decay test* untuk mempertimbangkan nilai faktor redaman.
2. Instrumen pengukuran gerak dan tegangan tali perlu diurus oleh profesional di bidangnya.
3. *Wave maker* perlu diperbarui dan diberi *maintenance* agar dapat digunakan dalam intensitas yang tinggi.
4. Dapat dilakukan studi parametrik lainnya (tambahan *helical strakes*, *moon pool*, *heave plate*, dan sebagainya) yang dapat memberikan desain optimal untuk model SPAR selanjutnya.

**HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN**

## **DAFTAR PUSTAKA**

- American Petroleum Institute, 2005. *Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures*. Washington D.C., USA: API RP 2SK, American Petroleum Institute.
- Barltrop, N., 1996. *Floating Structures: a guide for design and analysis Volume One*. Ledbury: Oilfield Publications Limited.
- Bhattacharyya, R., 1978. *Dynamic of Marine Vehicles*. USA: John Wiley & Sons.
- Chakrabarti, S. K., 1994. *Offshore Structure Modeling*. Plainfield: World Scientific.
- Chakrabarti, S. K., 2005. *Handbook of Offshore Engineering*. Illinois: Elsevier.
- Chen, X. B., 2011. Offshore hydrodynamics and applications. *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering Vol 4, No. 3*, pp. 124-142.
- Dawson, T. H., 1983. *Offshore Structure Engineering*. Michigan: Prentice-Hall.
- Deep Oil Technology Inc., 1995. *SPAR model test Joint Industry Project*, California: Deep Oil Technology Inc. .
- Det Norske Veritas, 2004. *Position Mooring*. Norway: DNV-OS-E-301, Det Norske Veritas.
- Djarmiko, E. B., 1992. *Hydro-structural Studies on Swath Type Vessel*. Glasgow: Glasgow Theses Service.
- Djarmiko, E. B., 2012. *Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di Atas Gelombang Acak*. Surabaya: ITSpress.
- Faltinsen, O. M., 1990. *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*. Cambridge: University of Cambridge .



Global Security, 2000. *Spar Platform*. [Online]

Available at: <http://www.globalsecurity.org/military/systems/ship/platform-spar.htm>

Hammoutene, A., 2006. *Offshore Mooring Lines (Offshore Consulting Engineering)*. [Online]

Available at: [www.dredgingengineering.com](http://www.dredgingengineering.com)

Jaelani, A., 2008. *Kajian Eksperimental Perbandingan Pengaruh Sistem Tambat Taut dan Catenary Terhadap Gerakan SPAR Tipe Klasik Akibat Beban Gelombang*. Surabaya: ITS.

Jose, G. & Philip, V., 2015. An Effectiveness of Mooring Lines on Spar Platform. *International Journal of Innovative Research & Development*, pp. 265-275.

Journee, J. & Massie, W., 2001. *Offshore Hydromechanics*. 1st penyunt. Delft : TU Delft.

Montasir, O., Yenduri, A. & Kurian, V., 2015. Effect of Mooring Line Configurations on The Dynamic Responses of Truss. *Ocean Engineering*, pp. 161-172.

Munson, Young, Okiishi & Huebsch, 2009. *Fundamental of Fluid Mechanics*. USA: R. R. Donnelley/Jefferson City.

Newman, J. N., 1977. *Marine Hydrodynamics*. USA: MIT.

Sarpkaya, T. "., 2010. *Wave Forces on Offshore Structures*. Cambridge: Cambridge University Press.

Seebai, T. & Sundaravadivelu, R., 2009. *Effect of Taut and Catenary Mooring on Spar Platform with 5MW Wind Turbine*. Chennai, International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE).

Wichers, J., 1986. *Progress in Computer Simulations of SPM Moored Vessels*. Houston, Offshore Technology Conference 5175.

Wichers, J., 1987. *The Prediction of The Behaviour of Single Point Moored Tankers*. Wageningen, Maritime Research Institute Netherlands.

Wichers, J., 1988. *Wave-Current Interaction Effects on Moored Tankers in High Seas*. Houston, Offshore Technology Conference 5631.

Wichers, J. & Huijsmans, R., 1984. *On the Low-Frequency Hydrodynamic Damping Forces Acting on Offshore Moored Vessels*. Houston, Offshore Technology Conference 4813.

**HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN**

**LAMPIRAN A**

**LAMPIRAN TABULASI DISTRIBUSI MASSA**  
**(TITIK BERAT DAN GIRASI)**

<b>Data Spar</b>
------------------

ID	12.80000256	cm
OD	14.00000256	cm
Draft	108.0076406	cm
Length	123.3676437	cm
Fairlead Depth	10.19124013	cm
Length	40	cm
Width	40	cm
Height	15.65257456	cm
Depth A	731.4287177	cm
Depth B	182.8571794	cm
KG	49.61768611	cm
Pitch Radius	49.17639079	cm
Roll Radius	49.17639079	cm

<b>Data Lab</b>		
Y=	1	g/cm <sup>3</sup>

<b>Displasemen teori</b>	
$\Delta = \gamma \nabla$	
$\Delta =$	13898.38934 g

Model
-------

Pre-initial  
design

Bagian	Tebal (cm)	Berat (g)	Jumlah	Total (g)
Blok A	Ballast 1	1628.489876	1	1628.489876
	2	6		6
	Ballast 2	1623.089876	1	1623.089876
	2	6		6
	Ballast 3	2094.089876	1	2094.089876
Blok B	2.5	6		6
	Ballast 4	663.589875	1	663.589875
	1	5		5
Topside	Cap	47.46	1	47.46
	0.3			
	Ballast 1	2096.689876	1	2096.689876
Blok B	2.5	6		6
	Ballast 2	465.989875	1	465.989875
	0.8	5		5
Tambahan	Ballast 3	179.489875	1	179.489875
	0.5	5		5
	0.3	599.5	1	599.5
Tambahan	Ulir (130 cm)	352.089875	1	352.089875
		5		5
	Pipa	4087.53	1	4087.529853
	-			
Tambahan	Penyambun g		1	0
	-			
Tambahan	Mur		2	0
	-			
Total				13838.0131

### 1. Blok A

Bagian	Tebal (cm)	VCG from keel (cm)	Massa (g)	Momen (g.cm)
Ballast 1	2	6.8	1628.489876	11073.73115
Ballast 2	2	4.8	1623.089876	7790.831403
Ballast 4	1	3.3	2094.089876	6910.496589
Ballast 3	2.5	1.6	663.5898755	1028.564307

<i>Cap</i>	0.3	0.2	47.46423964	7.119635947
<b>Total</b>			<b>6056.723742</b>	<b>26810.74309</b>

#### Pengecekan

$$\begin{aligned}\text{Error} &= \frac{\text{Model-Teori}}{\text{Teori}} \times 100\% \\ &= -0.4\% \text{ memenuhi}\end{aligned}$$

#### 2. Blok B

<b>Bagian</b>	<b>Tebal (cm)</b>	<b>VCG from keel (cm)</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>Momen (g.cm)</b>
<i>Ballast 7</i>	0.5	112.1	179.4898755	20111.84055
<i>Ballast 6</i>	0.8	111.4	465.9898755	51911.27213
<i>Ballast 5</i>	2.5	109.8	2096.689876	230111.7138
<b>Total</b>			<b>2742.169627</b>	<b>302134.8265</b>

$$\text{VCG Blok B} = \frac{\text{Momen massa}}{\text{massa}} = 110.1809398 \text{ cm dari keel}$$

#### 3. Tambahan

<b>Bagian</b>	<b>Tebal (cm)</b>	<b>VCG from keel (cm)</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>Momen (g.cm)</b>
<i>Ulir (130 cm)</i>	-	65.3	352.0898755	22991.46887
<i>Pipa</i>	-	61.7	4087.53	252200.5919
<i>Topside</i>	0.3	123.55	599.5	74068.225
<b>Total</b>			<b>5039.119729</b>	<b>349260.2858</b>

$$\text{VCG tambahan} = \frac{\text{Momen massa}}{\text{massa}} = 69.3097812 \text{ cm dari keel}$$

#### 4. Total

Bagian	Tebal (cm)	VCG from keel (cm)	Massa	Momen
Blok A	-	4.4	6056.723742	26810.74309
Blok B	-	110.2	2742.169627	302134.8265
Tambahan	-	69.3	5039.119729	349260.2858
<b>Total</b>			<b>13838.0131</b>	<b>678205.8554</b>

$$\text{VCG total} = \frac{\text{Momen massa}}{\text{massa}} = 49.01034929 \text{ cm dari keel}$$

#### Pengecekan

$$\begin{aligned} \text{Error} &= \frac{\text{Model-Teori}}{\text{Teori}} \times 100\% \\ &= -1.2\% \text{ memenuhi} \end{aligned}$$

### Perhitungan Radius girasi model

1. Blok A								
Bagian	Tebal (cm)	VCG from keel (cm)	LCG (cm)	TCG (cm)	Diameter (cm)	Massa (g)	lox (g.cm)	loy (g.cm)
Ballast 1	2	6.5	0	0	12.5	1628.4899	16446.0514	16446.0514
Ballast 2	2	4.5	0	0	12.5	1623.0899	16391.51702	16391.51702
Ballast 3	1	3.0	0	0	12.5	2094.0899	20624.60393	20624.60393
Ballast 4	2.5	1.3	0	0	12.5	663.58988	6825.989605	6825.989605
Cap	0.3	0.2	0	0	12.6	47.46424	471.3198997	471.3198997
2. Blok B								
Bagian	Tebal (cm)	VCG from keel (cm)	LCG (cm)	TCG (cm)	Diameter (cm)	Massa (g)	lox (g.cm)	loy (g.cm)
Ballast 7	0.5	112.05	0	0	12.5	179.48988	1756.570188	1756.570188
Ballast 6	0.8	111.4	0	0	12.5	465.98988	4556.895577	4556.895577
Ballast 5	2.5	109.75	0	0	12.5	2096.6899	20748.49356	20748.49356
3. Tambahan								
Bagian	Tebal (cm)	VCG from keel	LCG (cm)	TCG (cm)	Ukuran (cm)	Massa (g)	lox (g.cm)	loy (g.cm)
Ulir (130 cm)	0.8	65.3	0	0	1	352.08988	495873.9916	495873.9916
Pipa	123.4	61.7	0	0	14	4087.5299	5287070.0	5287069.989
Topside	0.3	123.55	0	0	40	599.5	79937.82958	79937.82958



4. Total														
Bagian		LCG (cm)	TCG (cm)	VCG from keel (cm)	Ditinjau dari COG (cm)	Massa (g)	lox (g.cm)	loy (g.cm)	y <sup>2</sup> +z <sup>2</sup>	x <sup>2</sup> +z <sup>2</sup>	w*(y <sup>2</sup> +z <sup>2</sup> )	w*(x <sup>2</sup> +z <sup>2</sup> )	lx (g.cm)	ly (g.cm)
Blok A	Ballast 1	0.00	0.00	6.50	-42.51	1628.49	16446.05	16446.05	1807.13	1807.13	2942892.58	2942892.58	2959338.63	2959338.63
	Ballast 2	0.00	0.00	4.50	-44.51	1623.09	16391.52	16391.52	1981.17	1981.17	3215618.91	3215618.91	3232010.42	3232010.42
	Ballast 3	0.00	0.00	3.00	-46.01	2094.09	20624.60	20624.60	2116.95	2116.95	4433088.26	4433088.26	4453712.86	4453712.86
	Ballast 4	0.00	0.00	1.25	-47.76	663.59	6825.99	6825.99	2281.05	2281.05	1513682.33	1513682.33	1520508.32	1520508.32
	Cap	0.00	0.00	0.15	-48.86	47.46	471.32	471.32	2387.33	2387.33	113312.98	113312.98	113784.30	113784.30
Blok B	Ballast 1	0.00	0.00	112.05	63.04	179.49	1756.57	1756.57	3974.00	3974.00	713292.33	713292.33	715048.90	715048.90
	Ballast 2	0.00	0.00	111.40	62.39	465.99	4556.90	4556.90	3892.47	3892.47	1813850.92	1813850.92	1818407.81	1818407.81
	Ballast 3	0.00	0.00	109.75	60.74	2096.69	20748.49	20748.49	3689.31	3689.31	7735328.79	7735328.79	7756077.29	7756077.29
Tambahan	Ulir (130 cm)	0.00	0.00	65.30	16.29	352.09	495873.99	495873.99	265.35	265.35	93428.01	93428.01	589302.00	589302.00
	Pipa	0.00	0.00	61.70	12.69	4087.53	5287069.99	5287069.99	161.03	161.03	658203.63	658203.63	5945273.62	5945273.62
	Topside	0.00	0.00	123.55	74.54	599.50	79937.83	79937.83	5556.16	5556.16	3330917.64	3330917.64	3410855.47	3410855.47
Total													32514319.61	32514319.6

#### 5. Jari Jari Girasi

Rxx= 48.47306334 cm

Ryy= 48.47306334 cm

#### 6. Check

Err Rxx= -1.43%

Err Ryy= -1.43%

memenuhi

memenuhi

## LAMPIRAN B

### Lampiran Pengukuran Periode Gerak Pendulum Model Spar

No uji coba	Model tanpa beban tambahan		Model dengan beban tambahan	
	Periode sepuluh getaran (s)	periode satu getaran (s)	Periode sepuluh getaran (s)	periode satu getaran (s)
1	34.918	3.492	35.131	3.513
2	35.063	3.506	35.226	3.523
3	34.958	3.496	35.159	3.516
4	34.727	3.473	35.231	3.523
5	34.973	3.497	35.058	3.506
6	35.037	3.504	35.236	3.524
7	34.882	3.488	35.026	3.503
8	34.800	3.480	35.148	3.515
9	35.160	3.516	35.330	3.533
10	35.220	3.522	35.530	3.553
11	34.746	3.475	35.460	3.546
12	34.858	3.486	35.040	3.504
13	35.150	3.515	36.110	3.611
14	34.896	3.490	35.117	3.512
15	35.510	3.551	35.200	3.520
16	35.000	3.500	36.030	3.603
17	34.880	3.488	35.120	3.512
18	35.060	3.506	36.020	3.602
19	35.180	3.518	35.970	3.597
20	34.850	3.485	35.132	3.513
21	34.910	3.491	35.760	3.576
22	35.240	3.524	35.920	3.592
23	35.310	3.531	35.570	3.557
24	35.030	3.503	35.183	3.518
25	35.140	3.514	35.390	3.539
26	34.900	3.490	35.790	3.579
27	35.271	3.527	35.370	3.537
28	34.970	3.497	36.080	3.608
29	35.130	3.513	35.105	3.511
30	35.038	3.504	35.191	3.519
31	35.220	3.522	35.084	3.508
32	34.910	3.491	35.135	3.514
33	34.852	3.485	35.650	3.565
34	34.678	3.468	36.120	3.612
35	34.960	3.496	34.960	3.496
36	35.110	3.511	35.450	3.545
37	35.070	3.507	36.050	3.605
38	35.210	3.521	35.820	3.582
39	35.102	3.510	35.660	3.566
40	34.940	3.494	35.790	3.579
41	34.810	3.481	35.150	3.515
42	35.012	3.501	35.380	3.538
43	35.111	3.511	35.250	3.525
44	34.938	3.494	35.143	3.514
45	34.900	3.490	35.117	3.512
46	34.985	3.499	35.252	3.525
47	35.109	3.511	35.252	3.525
48	35.131	3.513	35.049	3.505
49	34.995	3.500	35.038	3.504
50	35.158	3.516	35.025	3.503



## LAMPIRAN C

### ANALITIS *SURGE FREE FLOATING*

#### HULL

#### CHARACTERISTICS

	Full Scale	Satuan
Diameter	16.00	m
Draft	135.03	m
Length	154.23	m
Fairlead Depth	12.74	m

Density	1025.00	Kg/m <sup>3</sup>
Massa	27834342.56	kg
Added Mass	27834342.56	Kg/m
Massa total	55668685.11	kg
WPA	201.11	M2
Surge Stiffness	0	0
Natural Freq	0	0

T	$\omega$ (rad/s)	k	Fa	RAO
40	0.16	0.002515	1164633	0.848
35	0.18	0.003285	1448995	0.808
30	0.21	0.004471	1833155	0.751
25.00	0.25	0.006439	2349047	0.668
20.00	0.31	0.010061	3004819	0.547
19.00	0.33	0.011148	3146730	0.517
18.00	0.35	0.012421	3288510	0.485
17.00	0.37	0.013925	3427465	0.451
16.00	0.39	0.01572	3560267	0.415
15.00	0.42	0.017886	3683043	0.377
14.50	0.43	0.019141	3739372	0.358
14.00	0.45	0.020532	3791636	0.338
13.50	0.47	0.022081	3839355	0.318
13.00	0.48	0.023812	3882110	0.299
12.50	0.50	0.025756	3919578	0.279
12.00	0.52	0.027947	3951561	0.259
11.00	0.57	0.033259	3999122	0.220
10.50	0.60	0.036502	4015201	0.201
10.00	0.63	0.040243	4026808	0.183
9.50	0.66	0.044591	4034649	0.166
9.00	0.70	0.049683	4039531	0.149
8.50	0.74	0.0557	4042276	0.133
8.00	0.79	0.06288	4043636	0.118
7.50	0.84	0.071543	4044209	0.104

<b>T</b>	<b><math>\omega</math> (rad/s)</b>	<b>k</b>	<b>Fa</b>	<b>RAO</b>
7.00	0.90	0.082129	4044405	0.090
6.50	0.97	0.09525	4044456	0.078
6.00	1.05	0.111786	4044466	0.066
5.50	1.14	0.133035	4044467	0.056
5.00	1.26	0.160972	4044467	0.046
4.50	1.40	0.198731	4044467	0.037
4.00	1.57	0.251519	4044467	0.029
3.00	2.09	0.447145	4044467	0.017

# ANALITIS HEAVE FREE FLOATING

## HULL CHARACTERISTICS

	Full Scale	Model
Diameter	16.00	m
Draft	135.03	m
Length	154.23	m
Fairlead Depth	12.74	m

<b>Density</b>	1025.00	Kg/m3
<b>Massa</b>	27834342.56	kg
<b>Added Mass</b>	699995.77	kg
<b>Massa total</b>	28534338.32	kg
<b>WPA</b>	201.11	M2
<b>Heave Stiffness</b>	2022233.434	N/m
<b>Natural Freq</b>	0.26621452	Rad/s

T	$\omega$ (rad/s)	k	A	B	Fa	RAO
40	0.16	0.00251519	0.71204	2004961.7	1427619	1.083
35	0.18	0.003285146	0.64173	1999674.5	1283259	1.164
30	0.21	0.004471448	0.54675	1991528.2	1088868	1.413
25.00	0.25	0.006438886	0.41919	1978017.9	829174.8	3.772
20.00	0.31	0.010060759	0.25705	1953146.6	502064.7	0.632
19.00	0.33	0.011147655	0.22197	1945682.9	431876.9	0.393
18.00	0.35	0.01242069	0.18691	1936941.1	362036.2	0.249
17.00	0.37	0.013924926	0.15255	1926611.5	293913.5	0.157
16.00	0.39	0.015719936	0.11972	1914285.3	229176.7	0.096
15.00	0.42	0.017885793	0.08936	1899412.4	169736.2	0.057
14.50	0.43	0.019140564	0.07544	1890796	142632.6	0.043
14.00	0.45	0.020532161	0.06251	1881239.9	117601.6	0.032
13.50	0.47	0.022081226	0.05071	1870602.6	94866.19	0.023
13.00	0.48	0.023812447	0.04014	1858714.3	74614.24	0.016
12.50	0.50	0.025755543	0.03088	1845371.2	56983.26	0.011
12.00	0.52	0.027946552	0.02297	1830325.6	42044.43	0.007
11.00	0.57	0.033258707	0.01121	1793847.3	20111.96	0.003
10.50	0.60	0.036501619	0.00724	1771578.3	12819.2	0.002
10.00	0.63	0.040243035	0.00437	1745886.2	7622.812	0.001
9.50	0.66	0.044590621	0.00243	1716031.5	4165.593	0.000
9.00	0.70	0.04968276	0.00122	1681064	2051.76	0.000
8.50	0.74	0.055699703	0.00054	1639745.9	888.133	0.000
8.00	0.79	0.062879743	0.00021	1590440.9	326.7177	0.000

<b>T</b>	<b><math>\omega</math> (rad/s)</b>	<b>k</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>Fa</b>	<b>RAO</b>
7.50	0.84	0.071543174	0.00006	1530949.4	97.62967	0.000
7.00	0.90	0.082128643	0.00002	1458259.5	22.26952	0.000
6.50	0.97	0.095249788	0.00000	1368157.1	3.552812	0.000
6.00	1.05	0.111786209	0.00000	1254602.2	0.349322	0.000
5.50	1.14	0.133034827	0.00000	1108688.8	0.017518	0.000
5.00	1.26	0.160972141	0.00000	916844.43	0.000333	0.000
4.50	1.40	0.198731038	0.00000	657555.65	1.46E-06	0.000
4.00	1.57	0.25151897	0.00000	295063.11	5.25E-10	0.000
3.00	2.09	0.447144836	0.00000	1048291.6	6.3E-21	0.000

## ANALITIS PITCH FREE FLOATING

### HULL CHARACTERISTICS

	Full Scale	Satuan
Diameter	16.00	m
Draft	135.03	m
Length	154.23	m
Fairlead Depth	12.74	m

<b>Density</b>	1025.00	Kg/m <sup>3</sup>
<b>massa</b>	27828127.19	kg
<b>Momen inersia massa</b>	105178192100.4950	Kg m <sup>2</sup>
<b>Momen inersia massa tambah</b>	63106915260	Kg m <sup>2</sup>
<b>momen inelrsia total</b>	168285107360.79	Kg m <sup>2</sup>
<b>Pitch Stiffness</b>	1529619959	N m
<b>Natural Freq</b>	0.095338635	Rad/s

T	$\omega$ (rad/s)	k	Fa	Ma	RAO analitis	RAO analitis( $\theta$ /m)
40	0.16	0.00251519	-4043456	10823807	0.0041	0.2365
35	0.18	0.003285146	-4043456	15148371	0.0039	0.2229
30	0.21	0.004471448	-4043456	22422849	0.0038	0.2195
25.00	0.25	0.006438886	-4043456	35565381	0.0039	0.2239
20.00	0.31	0.010060759	-4043456	61036444	0.0040	0.2319
19.00	0.33	0.011147655	-4043456	68621963	0.0041	0.2330
18.00	0.35	0.01242069	-4043456	77341900	0.0041	0.2335
17.00	0.37	0.013924926	-4043456	87342108	0.0041	0.2332
16.00	0.39	0.015719936	-4043456	98759629	0.0040	0.2317
15.00	0.42	0.017885793	-4043456	1.12E+08	0.0040	0.2286
14.50	0.43	0.019140564	-4043456	1.19E+08	0.0039	0.2263
14.00	0.45	0.020532161	-4043456	1.26E+08	0.0039	0.2234
13.50	0.47	0.022081226	-4043456	1.34E+08	0.0038	0.2199
13.00	0.48	0.023812447	-4043456	1.42E+08	0.0038	0.2157
12.50	0.50	0.025755543	-4043456	1.51E+08	0.0037	0.2107
12.00	0.52	0.027946552	-4043456	1.6E+08	0.0036	0.2049
11.00	0.57	0.033258707	-4043456	1.78E+08	0.0033	0.1908
10.50	0.60	0.036501619	-4043456	1.87E+08	0.0032	0.1824
10.00	0.63	0.040243035	-4043456	1.96E+08	0.0030	0.1732
9.50	0.66	0.044590621	-4043456	2.05E+08	0.0028	0.1632



9.00	0.70	0.04968276	-4043456	2.14E+08	0.0027	0.1525
8.50	0.74	0.055699703	-4043456	2.23E+08	0.0025	0.1411
8.00	0.79	0.062879743	-4043456	2.31E+08	0.0023	0.1294
7.50	0.84	0.071543174	-4043456	2.39E+08	0.0020	0.1173
7.00	0.90	0.082128643	-4043456	2.46E+08	0.0018	0.1051
6.50	0.97	0.095249788	-4043456	2.53E+08	0.0016	0.0930
6.00	1.05	0.111786209	-4043456	2.59E+08	0.0014	0.0811
5.50	1.14	0.133034827	-4043456	2.65E+08	0.0012	0.0696
5.00	1.26	0.160972141	-4043456	2.7E+08	0.0010	0.0586
4.50	1.40	0.198731038	-4043456	2.75E+08	0.0008	0.0482
4.00	1.57	0.25151897	-4043456	2.79E+08	0.0007	0.0387
3.00	2.09	0.447144836	-4043456	2.86E+08	0.0004	0.0223

**LAMPIRAN D**  
**ANALITIS SURGE TERTAMBAT**

$$C_{11} = \sum_{i=1}^N k_i \cos^2 \varphi_i$$

**Data Mooring**

Lo	225	m
EA	1175000000	N
EA/Lo (ki)	5548996.458	N/m

**Sudut Sebar-Line**

$\beta_1$	45.000	deg
$\beta_2$	135.000	deg
$\beta_3$	225.000	deg
$\beta_4$	315.000	deg

	Full Scale	
Line 1	2774498	N/m
Line 2	2774498	N/m
Line 3	2774498	N/m
Line 4	2774498	N/m
K11	11097993	N/m

**Perhitungan Surge Tertambat**

<b>m</b>	27834342.56	kg	(massa)
<b>ma</b>	27834342.56	kg	(massa tambah)
<b>kh</b>	0.00	N/m	(kekakuan hidrostatik)
<b>km</b>	11097992.92	N/m	(kekakuan mooring)
<b>K</b>	11097992.92	N/m	(kekakuan total)
<b>b</b>	0.00	Ns/m	(damping)

T	$\omega$	Fa	RAO (m/m)
(s)	(rad/s)	(N)	Analitis
40.000	0.157	1164632.646	0.120
35.000	0.180	1448994.995	0.156
30.000	0.209	1833154.510	0.212
25.000	0.251	2349047.384	0.310
20.000	0.314	3004819.384	0.536
19.000	0.331	3146729.761	0.628

18.000	0.349	3288510.259	0.762
17.000	0.370	3427464.764	0.981
16.000	0.393	3560266.549	1.417
15.000	0.419	3683043.252	2.768
14.500	0.433	3739371.745	5.796
14.000	0.460	3791635.873	5.564
13.500	0.465	3839354.800	3.996
13.000	0.483	3882110.123	2.037
12.500	0.503	3919577.682	1.321
12.000	0.524	3951561.383	0.949
11.000	0.571	3999121.792	0.566
10.500	0.598	4015200.974	0.454
10.000	0.628	4026808.092	0.370
9.500	0.661	4034649.097	0.304
9.000	0.698	4039530.543	0.252
8.500	0.739	4042276.269	0.209
8.000	0.785	4043636.029	0.174
7.500	0.838	4044208.949	0.145
7.000	0.898	4044405.103	0.120
6.500	0.967	4044456.364	0.099
6.000	1.047	4044465.741	0.081
5.500	1.142	4044466.803	0.066
5.000	1.257	4044466.866	0.053
4.500	1.396	4044466.867	0.042
4.000	1.571	4044466.867	0.032
3.000	2.094	4044466.867	0.017

## ANALITIS HEAVE TERTAMBAT

### Data Mooring

Lo	225	m
EA	1175000000	N
EA/Lo	5548996.458	N/m
T	904874.400	N
L	211.173	m

### Sudut Tanah-Line

$\alpha_1$	60.000	deg
$\alpha_2$	60.000	deg
$\alpha_3$	60.000	deg
$\alpha_4$	60.000	deg

### Sudut Sebar-Line

$\beta_1$	45.000	deg
$\beta_2$	135.000	deg
$\beta_3$	225.000	deg
$\beta_4$	315.000	deg

	kp11 (N/m)	kp22 (N/m)	kp12 (N/m)
LineA	1390451.634	4162814.85	2400936.973
LineB	1390451.634	4162814.85	2400936.973
LineC	1390451.634	4162814.85	2400936.973
LineD	1390451.634	4162814.85	2400936.973

	k33	
LineA	4162815	N/m
LineB	4162815	N/m
LineC	4162815	N/m
LineD	4162815	N/m
K33 (TOTAL)	16651259	N/m

### Perhitungan Heave Tertambat

<b>m</b>	27834342.56	kg	(massa)
<b>ma</b>	27834342.56	kg	(massa tambah)
<b>kh</b>	2022233.434	N/m	(kekakuan hidrostatik)
<b>km</b>	16651259.40	N/m	(kekakuan mooring)
<b>K</b>	18673492.83	N/m	(kekakuan total)
<b>b</b>	0.00	Ns/m	(damping)

<b>T</b>	<b><math>\omega</math></b>	<b>Fa</b>	<b>RAO (m/m)</b>
<b>(s)</b>	<b>(rad/s)</b>	<b>(N)</b>	<b>Analitis</b>

40.000	0.157	1427619	0.079
35.000	0.180	1283259	0.072
30.000	0.209	1088868	0.063
25.000	0.251	829174.8	0.049
20.000	0.314	502064.7	0.032
19.000	0.331	431876.9	0.028
18.000	0.349	362036.2	0.024
17.000	0.370	293913.5	0.020
16.000	0.393	229176.7	0.016
15.000	0.419	169736.2	0.012
14.500	0.433	142632.6	0.011
14.000	0.449	117601.6	0.009
13.500	0.465	94866.19	0.008
13.000	0.483	74614.24	0.006
12.500	0.503	56983.26	0.005
12.000	0.524	42044.43	0.004
11.000	0.571	20111.96	0.002
10.500	0.598	12819.2	0.002
10.000	0.628	7622.812	0.001
9.500	0.661	4165.593	0.001
9.000	0.698	2051.76	0.000
8.500	0.739	888.133	0.000
8.000	0.785	326.7177	0.000
7.500	0.838	97.62967	0.000
7.000	0.898	22.26952	0.000
6.500	0.967	3.552812	0.000
6.000	1.047	0.349322	0.000
5.500	1.142	0.017518	0.000
5.000	1.257	0.000333	0.000
4.500	1.396	1.46E-06	0.000
4.000	1.571	5.25E-10	0.000
3.000	2.094	6.3E-21	0.000

### ANALITIS PITCH TERTAMBAT

Rho	55
w	539.55
Y	200
Tb	904874.4
L	211.75
Theta	60
	1.047197551
To	452437.2
I	1452.403332
xb	1104.329058
yb	838.5454545
ya	1038.545455
L'	1679.378397
L	226.9750657
xa	1211.576404
X	107.2473455
Ta	1012784.4
A	450.8857644
B	5.30912E-05
M	0.000183952
R	44.67260752

### K55

Line 1	5765049068.151	N
Line 2	5765049068.151	N
Line 3	5765049068.151	N
Line 4	5765049068.151	N
K11 Total	23060196272.604	N

### Perhitungan Pitch Tertambat

I	105201683462.20	kg m <sup>2</sup>
Ia	63121010077.32	kg m <sup>2</sup>
kh	1529619959.06	N/m
km	23060196272.60	N/m
K	24589816231.67	N/m
b	0.00	N s/m

T	$\omega$	Ma	RAO (deg/m)
(s)	(rad/s)	(N m)	Analitis
40.000	0.157	10828130.788	0.030
35.000	0.180	15154062.849	0.045

30.000	0.209	22430662.855	0.075
25.000	0.251	35576710.654	0.146
20.000	0.314	61054039.927	0.439
19.000	0.331	68641354.617	0.636
18.000	0.349	77363333.066	1.086
17.000	0.370	87365863.851	3.136
16.000	0.393	98786020.651	4.138
15.000	0.419	111731150.755	1.295
14.500	0.433	118793419.567	0.970
14.000	0.449	126247068.051	0.777
13.500	0.465	134081042.158	0.647
13.000	0.483	142274490.027	0.553
12.500	0.503	150795141.063	0.482
12.000	0.524	159597951.285	0.424
11.000	0.571	177802031.225	0.336
10.500	0.598	187046868.816	0.300
10.000	0.628	196265271.147	0.269
9.500	0.661	205359118.525	0.240
9.000	0.698	214231850.468	0.214
8.500	0.739	222795346.322	0.189
8.000	0.785	230976220.754	0.167
7.500	0.838	238719905.110	0.146
7.000	0.898	245991210.017	0.127
6.500	0.967	252771208.633	0.109
6.000	1.047	259051841.772	0.093
5.500	1.142	264830576.046	0.078
5.000	1.257	270106876.262	0.064
4.500	1.396	274880675.525	0.052
4.000	1.571	279151969.692	0.041
3.000	2.094	286187042.439	0.023

## LAMPIRAN E

### LAMPIRAN DATA INPUT MOSES EKSTENSI FILE .DAT (FREE FLOATING)

```
&dimen -save -dimen meters m-tons
&describe body spar
pgen A -loc 0 0 0 0 -90 0 -difftype 3ddiff -tanaka 1
plane 0 154.23 -circular 0 0 8 0 22.5 9
end pgen
```

### LAMPIRAN DATA INPUT MOSES EKSTENSI FILE .CIF (FREE FLOATING)

```
&dimen -remember -dimen meters m-tons
&device -oecho no
&title SPAR (3DDiff By MOSES)
&default -depth 500 -spgwater 1.025
inmodel
  &instate -condition spar 135.0264 0 0
  $
    &picture iso
    &picture top
    &picture side
    &picture bow
  $
  &weight -compute 62.029848      61.47816      61.47816 61.47816
  &equi
  &status
  $
  Hydrodynamics
  &PARAM -M_DIST 3.5
  &picture iso -type mesh -detail
  G_pressure spar pkt1 -heading 0 \
    -period 40 35 30 25 20 19 18 17 16 15 14.5 14\
    13.5 13 12.5 12 11 10.5 10 9.5 9\
    8.5 8 7.5 7 6.5 6 5.5 5 4.5 4 3
    HYDR_SUM
  end_Hydrodynamics
  $
  Freq_response
  rao -speed 0 -iter 500
  fp_std &body(cg spar)
  EQU_SUM
  matrices -file
  end
  exforce -file
  end
  end_freq_response
  &finish
```



## LAMPIRAN DATA INPUT MOSES EKSTENSI FILE .CIF TERTAMBAT

&dimen -remember -dimen meters m-tons

&device -oecho no

&title SPAR CATENARY MOORING 1 (3DDiff By MOSES)

&default -depth 226.8 -spgwater 1.025

inmodel

&instate -condition spar 135.0264 0 0

&picture iso

&picture top

&picture side

&picture bow

&weight -compute SPAR 62.029848 61.47816 61.47816 30

&equi

&status

medit

\*A 5.6567 5.6567 122.29

\*B 5.6567 -5.6567 122.29

\*C -5.6567 5.6567 122.29

\*D -5.6567 -5.6567 122.29

~wire b\_cat 115 -depanchor 226.8 -refine 30 -len 231.25 -b\_tension 1199.18 -wtplen 0.065 -  
buoydia 0 -EMODULUS 25492905.3244

Connector A -anc 45 126 ~wire \*A

Connector B -anc -45 126 ~wire \*B

Connector C -anc 135 126 ~wire \*C

Connector D -anc -135 126 ~wire \*D

end

&picture iso

&connector @ -l\_tension 92.24

\$&picture iso

\$&finish

CONN\_DESIGN

TABLE A B C D

REPORT

VLIST

PLOT 1 8 -rax 6 -NO

END

MOVE spar -line 0 2000 50

REPORT

VLIST

PLOT 1 7 -NO

END

END

```

&DCPTIME Time To End Mooring Design
&weight -compute SPAR 62.029848      61.47816      61.47816 30
&equi
&status
$&finish

```

```

Hydrodynamics
&PARA -M_DIST 3.5
&picture iso -type mesh -detail
G_pressure spar pkt1 -heading 0 \
    -period 40 35 30 25 20 19 18 17 16 15 14.5 14\
    13.5 13 12.5 12 11 10.5 10 9.5 9\
    8.5 8 7.5 7 6.5 6 5.5 5 4.5 4 3

```

```

    HYDR_SUM
end_Hydrodynamics
Freq_response
rao -speed 0 -iter 500
fp_std &body(cg spar)
EQU_SUM
matrices -file
end
exforce -file
end
fr_cforce A
    REPORT
        vlist
        plot 1 7 -no
end
fr_cforce B
    REPORT
        vlist
        plot 1 7 -no
end
fr_cforce C
    REPORT
        vlist
        plot 1 7 -no
end
fr_cforce D
    REPORT
        vlist
        plot 1 7 -no
end
end_freq_response
&finish

```

## LAMPIRAN DATA INPUT MOSES EKSTENSI FILE .CIF (1.5 VCG)

&dimen -remember -dimen meters m-tons

&device -oecho no

&title SPAR (3DDiff By MOSES)

&default -depth 226.8 -spgwater 1.025

inmodel

&instate -condition spar 135.0264 0 0

\$

\$ &picture iso

\$ &picture top

\$ &picture side

\$ &picture bow

&weight -compute SPAR 62.029848 61.47816 61.47816 30

&equi

&status

medit

\*A 5.6567 5.6567 93.03

\*B 5.6567 -5.6567 93.03

\*C -5.6567 5.6567 93.03

\*D -5.6567 -5.6567 93.03

\$PERLU RECHECK DENSITY MOORING SAMA YIELD STRESSNYA

~wire b\_cat 115 -depanchor 226.8 -refine 30 -len 191.2 -b\_tension 1199.18 -wtplen 0.065 -  
buoydia 0 -EMODULUS 25492905.3244

Connector A -anc 45 108 ~wire \*A

Connector B -anc -45 108 ~wire \*B

Connector C -anc 135 108 ~wire \*C

Connector D -anc -135 108 ~wire \*D

end

&picture iso

&picture side

&picture top

&connector @ -l\_tension 92.2

\$&picture iso

\$&finish

CONN\_DESIGN

TABLE A B C D

REPORT

VLIST

PLOT 1 8 -rax 6 -NO

END

MOVE spar -line 0 2000 50

REPORT

VLIST

PLOT 1 7 -NO

END

END

&DCPTIME Time To End Mooring Design

&weight -compute SPAR 62.029848 61.47816 61.47816 30

&equi

&status

\$&finish

Hydrodynamics

&PARAM -M\_DIST 3.5

&picture iso -type mesh -detail

G\_pressure spar pkt1 -heading 0 \

-period 40 35 30 25 20 19 18 17 16 15 14.5 14\

13.5 13 12.5 12 11 10.5 10 9.5 9\

8.5 8 7.5 7 6.5 6 5.5 5 4.5 4 3

HYDR\_SUM

end\_Hydrodynamics

\$

Freq\_response

rao -speed 0 -iter 500

fp\_std &body(cg spar)

EQU\_SUM

matrices -file

end

exforce -file

end

fr\_cforce A

REPORT

vlist

plot 1 7 -no

end

fr\_cforce B

REPORT

vlist

plot 1 7 -no

end

fr\_cforce C

REPORT

vlist

plot 1 7 -no

end

fr\_cforce D

REPORT

vlist

plot 1 7 -no

end

end\_freq\_response

&finish

**LAMPIRAN DATA INPUT MOSES EKSTENSI FILE .CIF (1.25 VCG)**

&dimen -remember -dimen meters m-tons

&device -oecho no

&title SPAR (3DDiff By MOSES)

&default -depth 226.8 -spgwater 1.025

inmodel

&instate -condition spar 135.0264 0 0

\$

\$ &picture iso

\$ &picture top

\$ &picture side

\$ &picture bow

&weight -compute SPAR 62.029848 61.47816 61.47816 30

&equi

&status

medit

\*A 5.6567 5.6567 77.525

\*B 5.6567 -5.6567 77.525

\*C -5.6567 5.6567 77.525

\*D -5.6567 -5.6567 77.525

\$PERLU RECHECK DENSITY MOORING SAMA YIELD STRESSNYA

~wire b\_cat 115 -depanchor 226.8 -refine 30 -len 173.3 -b\_tension 1199.18 -wtplen 0.065 -  
buoydia 0 -EMODULUS 25492905.3244

Connector A -anc 45 99.1 ~wire \*A

Connector B -anc -45 99.1 ~wire \*B

Connector C -anc 135 99.1 ~wire \*C

Connector D -anc -135 99.1 ~wire \*D

end

&picture iso

&picture side

&picture top

&connector @ -l\_tension 92.2

\$&picture iso

\$&finish

CONN\_DESIGN

TABLE A B C D

REPORT

VLIST

PLOT 1 8 -rax 6 -NO

END

MOVE spar -line 0 2000 50

REPORT

VLIST

PLOT 1 7 -NO

END

END

&DCPTIME Time To End Mooring Design

&weight -compute SPAR 62.029848 61.47816 61.47816 30

&equi

&status

\$&finish

Hydrodynamics

&PARA -M\_DIST 3.5

&picture iso -type mesh -detail

G\_pressure spar pkt1 -heading 0 \

-period 40 35 30 25 20 19 18 17 16 15 14.5 14\

13.5 13 12.5 12 11 10.5 10 9.5 9\

8.5 8 7.5 7 6.5 6 5.5 5 4.5 4 3

HYDR\_SUM

end\_Hydrodynamics

\$

Freq\_response

rao -speed 0 -iter 500

fp\_std &body(cg spar)

EQU\_SUM

matrices -file

```
end
exforce -file
end
fr_cforce A
  REPORT
    vlist
    plot 1 7 -no
end
fr_cforce B
  REPORT
    vlist
    plot 1 7 -no
end
fr_cforce C
  REPORT
    vlist
    plot 1 7 -no
end
fr_cforce D
  REPORT
    vlist
    plot 1 7 -no
end
end_freq_response
&finish
```

### **LAMPIRAN DATA INPUT MOSES EKSTENSI FILE .CIF (1.0 VCG)**

```
&dimen -remember -dimen meters m-tons
&device -oecho no
&title SPAR (3DDiff By MOSES)
&default -depth 226.8 -spgwater 1.025
inmodel
&instate -condition spar 135.0264 0 0
```



```

$
$      &picture iso
$      &picture top
$      &picture side
$      &picture bow
&weight -compute SPAR 62.029848      61.47816      61.47816 30
&equi
&status
medit
*A 5.6567 5.6567 62.02
*B 5.6567 -5.6567 62.02
*C -5.6567 5.6567 62.02
*D -5.6567 -5.6567 62.02
$PERLU RECHECK DENSITY MOORING SAMA YIELD STRESSNYA
~wire b_cat 115 -depanchor 226.8 -refine 30 -len 155.4 -b_tension 1199.18 -wtplen 0.065 -
buoydia 0 -EMODULUS 25492905.3244
Connector A -anc 45 90.1 ~wire *A
Connector B -anc -45 90.1 ~wire *B
Connector C -anc 135 90.1 ~wire *C
Connector D -anc -135 90.1 ~wire *D
end
&picture iso
&picture side
&picture top
&connector @ -l_tension 92.2
$&picture iso
$&finish
CONN_DESIGN
TABLE A B C D
REPORT
VLIST
PLOT 1 8 -rax 6 -NO

```

```

END
    MOVE spar -line 0 2000 50
REPORT
VLIST
PLOT 1 7 -NO
END
END
&DCPTIME Time To End Mooring Design
&weight -compute SPAR 62.029848      61.47816      61.47816 30
&equi
&status
$&finish
Hydrodynamics
&PARAM -M_DIST 3.5
&picture iso -type mesh -detail
G_pressure spar pkt1 -heading 0 \
                                -period 40 35 30 25 20 19 18 17 16 15 14.5 14\
                                           13.5 13 12.5 12 11 10.5 10 9.5 9\
                                           8.5 8 7.5 7 6.5 6 5.5 5 4.5 4 3

    HYDR_SUM
end_Hydrodynamics
$
Freq_response
rao -speed 0 -iter 500
fp_std &body(cg spar)
EQU_SUM
matrices -file
end
exforce -file
end
fr_cforce A
REPORT

```

```
        vlist
        plot 1 7 -no
    end
fr_cforce B
    REPORT
        vlist
        plot 1 7 -no
    end
fr_cforce C
    REPORT
        vlist
        plot 1 7 -no
    end
fr_cforce D
    REPORT
        vlist
        plot 1 7 -no
    end
end_freq_response
&finish
```

## LAMPIRAN F

### NUMERIS FREE FLOATING

WELCOME TO MOSES Version 07.10.01.11

=====

This Program is licensed for the exclusive use of  
Institut Teknologi SepuluhSura

Copying of this program or use by anyone other  
than an employee of the above firm without  
written consent of Bentley Systems is strictly  
prohibited.

Default License Suite: MOSES Automatic Elevation

=====

>&dimen -remember -dimen meters m-tons

>&device -oecho no

>&title SPAR (3DDiff By MOSES)

>&default -depth 500 -spgwater 1.0

>inmodel

Time To perform Inmodel : CP= 0.22

>&instate -condition spar 135.0264 0 0

>&picture iso

>&picture top

>&picture side

>&picture bow

>&weight -compute 62.029848 61.47816 61.47816 61.47816

>&equi

+++ CURRENT SYSTEM CONFIGURATION +++

=====

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

Location and Net Force at Body Origin

	Body	X	Y	Z	RX	RY	RZ
SPAR	Location	0.00	0.00	-135.03	0.00	0.00	0.00
	N Force	0.00	0.00	-0.00	0	0	0

Equilibrium Converged in 1 Iterations

>&status

+++ BUOYANCY AND WEIGHT FOR SPAR +++

=====

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

Results Are Reported In Body System

Draft = 135.03 Roll Angle = 0.00 Pitch Angle = 0.00

Wet Radii Of Gyration About CG

K-X = 61.48 K-Y = 61.48 K-Z = 61.48

GMT = 5.60 GML = 5.60

/-- Center of Gravity ---/ Sounding % Full  
Name Weight ---X--- ---Y--- ---Z--- -----

----- Part SPAR -----

LOAD\_GRO 27148.66 0.00 0.00 62.03

=====

Total 27148.66 0.00 0.00 62.03

Buoyancy 27148.66 -0.00 0.00 67.51

>Hydrodynamics

>&PARA -M\_DIST 3.5

>&picture iso -type mesh -detail

>G\_pressure spar pkt1 -heading 0 22.5 45 -period 40 35 30 25 20 19 18 17 16 \

15 14.5 14 13.5 13 12.5 12 11 10.5 10 9.5 9 8.5 8 7.5 7 6.5 6 5.5 5 \

4.5 4 3

Setting Pressure Name for SPAR to PKT1

=====

Mesh Refined: Number of Basic Panels 17 - Panels Used 640

Time to Generate 640 Panels For S : CP= 0.05

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 1 : CP= 0.69

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 2 : CP= 0.53

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 3 : CP= 0.49

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 4 : CP= 0.51

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 5 : CP= 0.77

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 6 : CP= 0.70

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 7 : CP= 0.61

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 8 : CP= 0.43

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 9 : CP= 0.54

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 10 : CP= 0.40

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 11 : CP= 0.42

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 12 : CP= 0.48

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 13 : CP= 0.38

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 14 : CP= 0.38

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 15 : CP= 0.50

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 16 : CP= 0.49

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 17 : CP= 0.39

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 18 : CP= 0.37

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 19 : CP= 0.38

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 20 : CP= 0.39

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 21 : CP= 0.37

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 22 : CP= 0.36

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 23 : CP= 0.39

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 24 : CP= 0.39

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 25 : CP= 0.37

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 26 : CP= 0.39

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 27 : CP= 0.36

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 28 : CP= 0.40

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 29 : CP= 0.37

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 30 : CP= 0.44

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 31 : CP= 0.59

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 32 : CP= 1.35

Setting Drift Name for SPAR to PKT1

\*\*\* WARNING: Negative On Diagonal Of Damping

Time To Set Up Convolution For PKT1 : CP= 0.09  
Time to Sum Pressures For 640 Panels on SPAR : CP= 0.01

>HYDR\_SUM  
>end\_Hydrodynamics  
>  
>Freq\_response  
>rao -speed 0 -iter 500  
Time To Compute RAOs : CP= 0.04  
>fp\_std 1.704959E-5 1.724023E-7 62.02985  
>EQU\_SUM  
>matrices -file  
>end  
>exforce -file  
>end  
>end\_freq\_response  
>  
>&finish

MOSES Finished with 1 Warnings

CP Time 16.80

Total Units 16.80



\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

```

*                                     *** MOSES ***                               *
*                                     ----- July 17, 2017                         *
*      SPAR (3DDiff By MOSES)                                                    *
*                                                                                   *
* Draft      = 135.0 Meters   Trim Angle   = 0.00 Deg.   GMT      =
*                                     5.6 Meters *
* Roll Gy. Radius = 61.5 Meters   Pitch Gy. Radius = 61.5 Meters   Yaw Gy.
*                                     Radius = 61.5 Meters *
* Heading     = 0.00 Deg.   Forward Speed = 0.00 Knots   Linearization
*                                     Based on 1/ 20   *
*                                                                                   *

```

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

### +++ MOTION RESPONSE OPERATORS+++

=====

Results are in Body System

Of Point On Body SPAR At X = 0.0 Y = 0.0 Z = 62.0

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

ENCOUNTER	Surge /	Sway /	Heave /	Roll /	Pitch /
	Yaw /				
-----	Wave Ampl.	Wave Ampl.	Wave Ampl.	Wave Ampl.	Wave Ampl.
	Wave Ampl.	Wave Ampl.			
Frequency	Period	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/
		/-----/	/-----/	/-----/	/-----/
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase
		Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase
0.1571	40.00	0.946 90	0.000 0	1.109 0	0.000 0
			0.000 0		
0.1795	35.00	0.851 90	0.000 0	1.193 0	0.000 0
			0.000 0		
0.2094	30.00	0.758 90	0.000 0	1.454 0	0.000 0
			0.000 0		
0.2513	25.00	0.660 90	0.000 0	4.297 0	0.000 0
			0.000 0		
0.3142	20.00	0.536 90	0.000 0	0.583 -179	0.000 0
			90 0.000 0		
0.3307	19.00	0.506 90	0.000 0	0.365 -179	0.000 0
			90 0.000 0		
0.3491	18.00	0.474 90	0.000 0	0.232 -178	0.000 0
			90 0.000 0		
0.3696	17.00	0.440 90	0.000 0	0.146 -178	0.000 0
			90 0.000 0		



0.3927	16.00	0.404	90	0.000	0	0.089	-178	0.000	0	0.240	
			90	0.000	0						
0.4189	15.00	0.366	90	0.000	0	0.052	-178	0.000	0	0.239	
			90	0.000	0						
0.4333	14.50	0.347	90	0.000	0	0.039	-178	0.000	0	0.238	
			90	0.000	0						
0.4488	14.00	0.328	90	0.000	0	0.029	-178	0.000	0	0.236	
			90	0.000	0						
0.4654	13.50	0.308	90	0.000	0	0.021	-178	0.000	0	0.233	
			90	0.000	0						
0.4833	13.00	0.288	90	0.000	0	0.015	-177	0.000	0	0.230	
			90	0.000	0						
0.5027	12.50	0.269	90	0.000	0	0.010	-177	0.000	0	0.226	
			90	0.000	0						
0.5236	12.00	0.249	90	0.000	0	0.006	-177	0.000	0	0.220	
			90	0.000	0						
0.5712	11.00	0.211	89	0.000	0	0.002	-176	0.000	0	0.207	
			89	0.000	0						
0.5984	10.50	0.193	89	0.000	0	0.001	-175	0.000	0	0.199	
			89	0.000	0						
0.6283	10.00	0.175	88	0.000	0	0.001	-175	0.000	0	0.190	
			88	0.000	0						
0.6614	9.50	0.158	88	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.179	88
				0.000	0						
0.6981	9.00	0.141	87	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.168	87
				0.000	0						
0.7392	8.50	0.125	86	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.155	86
				0.000	0						
0.7854	8.00	0.110	85	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.141	85
				0.000	0						
0.8378	7.50	0.094	83	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.126	83
				0.000	0						
0.8976	7.00	0.079	81	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.109	81
				0.000	0						
0.9666	6.50	0.064	79	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.091	79
				0.000	0						
1.0472	6.00	0.050	77	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.072	76
				0.000	0						
1.1424	5.50	0.036	75	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.054	75
				0.000	0						
1.2566	5.00	0.024	77	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.036	77
				0.000	0						
1.3963	4.50	0.015	84	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.023	84
				0.000	0						
1.5708	4.00	0.008	99	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.013	99
				0.000	0						
2.0944	3.00	0.001	157	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.001	156
				0.000	0						

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

=====

**Of Point On Body SPAR At X = 0.0 Y = 0.0 Z = 62.0**

0.1571	40.00	0.874	90	0.362	90	1.109	0	0.088	-89	0.213	90
				0.000	0						
0.1795	35.00	0.786	90	0.326	90	1.193	0	0.080	-89	0.193	90
				0.000	0						
0.2094	30.00	0.700	90	0.290	90	1.454	0	0.078	-89	0.189	90
				0.000	0						
0.2513	25.00	0.610	90	0.253	90	4.297	0	0.082	-89	0.198	90
				0.000	0						
0.3142	20.00	0.495	90	0.205	90	0.583	-179	0.089	-89	0.214	90
				0.000	0						
0.3307	19.00	0.467	90	0.194	90	0.365	-179	0.090	-89	0.217	90
				0.000	0						
0.3491	18.00	0.438	90	0.181	90	0.232	-178	0.091	-89	0.219	90
				0.000	0						

0.3696	17.00	0.406	90	0.168	90	0.146	-178	0.092	-89	0.221	90
				0.000	0						
0.3927	16.00	0.373	90	0.154	90	0.089	-178	0.092	-89	0.222	90
				0.000	0						
0.4189	15.00	0.338	90	0.140	90	0.052	-178	0.091	-89	0.221	90
				0.000	0						
0.4333	14.50	0.321	90	0.133	90	0.039	-178	0.091	-89	0.220	90
				0.000	0						
0.4488	14.00	0.303	90	0.125	90	0.029	-178	0.090	-89	0.218	90
				0.000	0						
0.4654	13.50	0.285	90	0.118	90	0.021	-178	0.089	-89	0.215	90
				0.000	0						
0.4833	13.00	0.266	90	0.110	90	0.015	-177	0.088	-89	0.212	90
				0.000	0						
0.5027	12.50	0.248	90	0.103	90	0.010	-177	0.086	-89	0.208	90
				0.000	0						
0.5236	12.00	0.230	90	0.095	90	0.006	-177	0.084	-89	0.204	90
				0.000	0						
0.5712	11.00	0.195	89	0.081	89	0.002	-176	0.079	-90	0.191	89
				0.000	0						
0.5984	10.50	0.178	89	0.074	89	0.001	-175	0.076	-90	0.184	89
				0.000	0						
0.6283	10.00	0.162	88	0.067	88	0.001	-175	0.073	-91	0.175	88
				0.000	0						
0.6614	9.50	0.146	88	0.060	88	0.000	0	0.069	-91	0.166	88
				0.000	0						
0.6981	9.00	0.130	87	0.054	87	0.000	0	0.064	-92	0.155	87
				0.000	0						
0.7392	8.50	0.116	86	0.048	86	0.000	0	0.059	-93	0.143	86
				0.000	0						
0.7854	8.00	0.101	85	0.042	85	0.000	0	0.054	-94	0.130	85
				0.000	0						
0.8378	7.50	0.087	83	0.036	83	0.000	0	0.048	-96	0.116	83
				0.000	0						
0.8976	7.00	0.073	81	0.030	81	0.000	0	0.042	-98	0.101	81
				0.000	0						
0.9666	6.50	0.059	79	0.025	79	0.000	0	0.035	-100	0.085	79
				0.000	0						
1.0472	6.00	0.046	77	0.019	77	0.000	0	0.028	-103	0.067	76
				0.000	0						
1.1424	5.50	0.033	75	0.014	75	0.000	0	0.021	-104	0.050	75
				0.000	0						
1.2566	5.00	0.022	77	0.009	77	0.000	0	0.014	-102	0.034	77
				0.000	0						
1.3963	4.50	0.013	84	0.006	84	0.000	0	0.009	-95	0.021	84
				0.000	0						
1.5708	4.00	0.007	99	0.003	99	0.000	0	0.005	-80	0.012	99
				0.000	0						

2.0944 3.00 0.001 157 0.000 0 0.000 0 0.001 -23 0.001 156  
0.000 0

Page 11 Licensee - Institut Teknologi SepuluhSura Rev 07.10.01.11

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

\* \*\*\* MOSES \*\*\* \*

\* ----- July 17, 2017 \*

\* SPAR (3DDiff By MOSES) \*

\* \*

\* Draft = 135.0 Meters Trim Angle = 0.00 Deg. GMT = 5.6  
Meters \*

\* Roll Gy. Radius = 61.5 Meters Pitch Gy. Radius = 61.5 Meters Yaw Gy. Radius  
= 61.5 Meters \*

\* Heading = 45.00 Deg. Forward Speed = 0.00 Knots Linearization Based  
on 1/ 20 \*

\* \*

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

### +++ MOTION RESPONSE OPERATORS +++

=====

Results are in Body System

Of Point On Body SPAR At X = 0.0 Y = 0.0 Z = 62.0

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

ENCOUNTER	Surge /	Sway /	Heave /	Roll /	Pitch /	Yaw
	Wave Ampl.	Wave Ampl.	Wave Ampl.	Wave Ampl.	Wave Ampl.	
	Wave Ampl.	Wave Ampl.				
Frequency	Period	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/
		-----/				
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase	
		Ampl. Phase	Ampl. Phase			
0.1571	40.00	0.669 90	0.669 90	1.109 0	0.163 -89	0.163 90
			0.000 0			
0.1795	35.00	0.602 90	0.602 90	1.193 0	0.148 -89	0.148 90
			0.000 0			
0.2094	30.00	0.536 90	0.536 90	1.454 0	0.145 -89	0.145 90
			0.000 0			
0.2513	25.00	0.467 90	0.467 90	4.297 0	0.151 -89	0.151 90
			0.000 0			
0.3142	20.00	0.379 90	0.379 90	0.583 -179	0.164 -89	0.164 90
			0.000 0			

0.3307	19.00	0.358	90	0.358	90	0.365	-179	0.166	-89	0.166	90
				0.000	0						
0.3491	18.00	0.335	90	0.335	90	0.232	-178	0.168	-89	0.168	90
				0.000	0						
0.3696	17.00	0.311	90	0.311	90	0.146	-178	0.169	-89	0.169	90
				0.000	0						
0.3927	16.00	0.285	90	0.285	90	0.089	-178	0.170	-89	0.170	90
				0.000	0						
0.4189	15.00	0.259	90	0.259	90	0.052	-178	0.169	-89	0.169	90
				0.000	0						
0.4333	14.50	0.245	90	0.245	90	0.039	-178	0.168	-89	0.168	90
				0.000	0						
0.4488	14.00	0.232	90	0.232	90	0.029	-178	0.167	-89	0.167	90
				0.000	0						
0.4654	13.50	0.218	90	0.218	90	0.021	-178	0.165	-89	0.165	90
				0.000	0						
0.4833	13.00	0.204	90	0.204	90	0.015	-177	0.162	-89	0.162	90
				0.000	0						
0.5027	12.50	0.190	90	0.190	90	0.010	-177	0.160	-89	0.160	90
				0.000	0						
0.5236	12.00	0.176	90	0.176	90	0.006	-177	0.156	-89	0.156	90
				0.000	0						
0.5712	11.00	0.149	89	0.149	89	0.002	-176	0.147	-90	0.147	89
				0.000	0						
0.5984	10.50	0.136	89	0.136	89	0.001	-175	0.141	-90	0.141	89
				0.000	0						
0.6283	10.00	0.124	88	0.124	88	0.001	-175	0.134	-91	0.134	88
				0.000	0						
0.6614	9.50	0.112	88	0.112	88	0.000	0	0.127	-91	0.127	88
				0.000	0						
0.6981	9.00	0.100	87	0.100	87	0.000	0	0.119	-92	0.119	87
				0.000	0						
0.7392	8.50	0.089	86	0.089	86	0.000	0	0.110	-93	0.110	86
				0.000	0						
0.7854	8.00	0.078	85	0.078	85	0.000	0	0.100	-94	0.100	85
				0.000	0						
0.8378	7.50	0.067	83	0.067	83	0.000	0	0.089	-96	0.089	83
				0.000	0						
0.8976	7.00	0.056	81	0.056	81	0.000	0	0.077	-98	0.077	81
				0.000	0						
0.9666	6.50	0.046	79	0.046	79	0.000	0	0.065	-100	0.065	79
				0.000	0						
1.0472	6.00	0.035	77	0.035	77	0.000	0	0.051	-103	0.051	76
				0.000	0						
1.1424	5.50	0.025	75	0.025	75	0.000	0	0.038	-104	0.038	75
				0.000	0						
1.2566	5.00	0.017	77	0.017	77	0.000	0	0.026	-102	0.026	77
				0.000	0						

1.3963	4.50	0.010	84	0.010	84	0.000	0	0.016	-95	0.016	84
				0.000	0						
1.5708	4.00	0.006	99	0.006	99	0.000	0	0.009	-80	0.009	99
				0.000	0						
2.0944	3.00	0.001	157	0.001	157	0.000	0	0.001	-23	0.001	156
				0.000	0						



# LAMPIRAN G

## NUMERIS TERTAMBAT

WELCOME TO MOSES Version 07.10.01.11

=====

This Program is licensed for the exclusive use of  
Institut Teknologi SepuluhSura  
Copying of this program or use by anyone other  
than an employee of the above firm without  
written consent of Bentley Systems is strictly  
prohibited.

Default License Suite: MOSES Automatic Elevation

=====

>&dimen -remember -dimen meters m-tons  
>&device -oecho no  
>&title SPAR (3DDiff By MOSES)  
>&default -depth 226.8 -spgwater 1.025  
>inmodel

Time To perform Inmodel : CP= 0.30

>&instate -condition spar 135.0264 0 0

>&weight -compute SPAR 62.029848 61.47816 61.47816 30  
>&equi

+++ CURRENT SYSTEM CONFIGURATION +++

=====

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified  
Location and Net Force at Body Origin

Body	X	Y	Z	RX	RY	RZ
SPAR Location	0.00	0.00	-135.03	0.00	0.00	0.00
N Force	-0.00	0.00	-0.00	0	0	0

Equilibrium Converged in 1 Iterations

>&status

+++ BUOYANCY AND WEIGHT FOR SPAR +++

=====

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified  
Results Are Reported In Body System

Draft = 135.03 Roll Angle = 0.00 Pitch Angle = 0.00

Wet Radii Of Gyration About CG

K-X = 61.48 K-Y = 61.48 K-Z = 30.00

GMT = 5.60 GML = 5.60

/-- Center of Gravity ---/ Sounding % Full

Name	Weight	--X--	--Y--	--Z--	-----
----- Part SPAR -----					

LOAD_GRO	27117.65	0.00	0.00	62.03
----------	----------	------	------	-------

=====

Total	27117.65	0.00	0.00	62.03
-------	----------	------	------	-------

Buoyancy	27117.65	-0.00	0.00	67.51
----------	----------	-------	------	-------

>

>medit

>\*A 5.6567 5.6567 122.29

>\*B 5.6567 -5.6567 122.29

>\*C -5.6567 5.6567 122.29

>\*D -5.6567 -5.6567 122.29

>~wire b\_cat 115 -depanchor 226.8 -refine 30 -len 225 -b\_tension 1199.18 \  
-wtplen 0.065 -buoydia 0 -EMODULUS 25492905.3244



```

>
>Connector IV -anc 45 126 ~wire *A
>Connector I -anc -45 126 ~wire *B
>Connector III -anc 135 126 ~wire *C
>Connector II -anc -135 126 ~wire *D
>end
>&connector @ -l_tension 92.24
Changing Length of Connector I
=====
Changing Length of Connector II
=====
Changing Length of Connector III
=====
Changing Length of Connector IV
=====
>&picture iso
>&picture top
>CONN_DESIGN
>TABLE I
>REPORT
>VLIST
The Variables Available for Selection are:
=====
1 Horizontal Distance  5 Max T/Break  9 Hor. Pull On Anchor
2 Horiz. Force At Top  6 Critical Break  10 Line On Bottom
3 DHDX  7 Critical Segment  11 Height Of 1st Conn.
4 Tension At Top  8 Vert Pull On Anchor  12 Load On 1st Conn.

>PLOT 1 8 -rax 6 -NO
>END
>MOVE spar -line 0 200 50
>REPORT
>VLIST
The Variables Available for Selection are:
=====
1 Excursion:SPAR  6 Y Restoring Force  10 Max Ratio
2 Angle  7 Res.Restoring Force  11 Min Tension
3 X Excursion  8 Max Tension  12 Min Horizontal
4 Y Excursion  9 Max Horizontal  13 Min Ratio
5 X Restoring Force
>PLOT 1 7 -NO
>END
>END
>&DCPTIME Time To End Mooring Design
Time To End Mooring Design : CP= 0.25
>&weight -compute SPAR 62.029848 61.47816 61.47816 30
>&equi
+++ CURRENT SYSTEM CONFIGURATION +++
=====

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified
Location and Net Force at Body Origin

Body      X      Y      Z      RX      RY      RZ
-----
SPAR Location 0.00 0.00 -135.03 0.00 0.00 0.00
N Force -0.00 0.00 -0.00 0 0 0

```

```

Equilibrium Converged in 1 Iterations
>&status
>Hydrodynamics
>&PARA -M_DIST 3.5
>&picture iso -type mesh -detail
>G_pressure spar pkt1 -heading 0 22.5 45 -period 40 35 30 25 20 19 18 17 16 \
15 14.5 14 13.5 13 12.5 12 11 10.5 10 9.5 9 8.5 8 7.5 7 6.5 6 5.5 5 \
4.5 4 3

```

Setting Pressure Name for SPAR to PKT1

=====

Mesh Refined: Number of Basic Panels 17 - Panels Used 640

Time to Generate 640 Panels For S	: CP=	0.06
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 1	: CP=	11.07
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 2	: CP=	2.28
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 3	: CP=	0.87
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 4	: CP=	0.98
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 5	: CP=	0.61
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 6	: CP=	0.66
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 7	: CP=	4.43
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 8	: CP=	0.80
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 9	: CP=	1.47
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 10	: CP=	1.36
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 11	: CP=	1.23
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 12	: CP=	0.89
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 13	: CP=	0.81
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 14	: CP=	0.98
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 15	: CP=	0.96
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 16	: CP=	0.99
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 17	: CP=	0.59
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 18	: CP=	0.77
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 19	: CP=	0.77
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 20	: CP=	0.61
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 21	: CP=	0.70
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 22	: CP=	0.55
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 23	: CP=	0.57
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 24	: CP=	0.98
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 25	: CP=	0.44
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 26	: CP=	1.13
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 27	: CP=	0.57
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 28	: CP=	0.73
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 29	: CP=	0.45
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 30	: CP=	0.60
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 31	: CP=	0.83
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 32	: CP=	1.57

Setting Drift Name for SPAR to PKT1

=====

\*\*\* WARNING: Negative On Diagonal Of Damping

=====

```

Time To Set Up Convolution For PKT1      : CP=  0.08
Time to Sum Pressures For 640 Panels on SPAR : CP=  0.02
>HYDR_SUM
>end_Hydrodynamics
>
>Freq_response
>rao -speed 0 -iter 500
Time To Compute RAOs                    : CP=  0.05

```

>fp\_std 6.857014E-6 9.848904E-8 62.02985

>EQU\_SUM

>matrices -file

>end

>exforce -file

>end

>fr\_cforce I

>REPORT

>vlist

The Variables Available for Selection are:

=====

1 Frequency	6 FY-Phase:I	11 MY-Amp:I
2 Period	7 FZ-Amp:I	12 MY-Phase:I
3 FX-Amp:I	8 FZ-Phase:I	13 MZ-Amp:I
4 FX-Phase:I	9 MX-Amp:I	14 MZ-Phase:I
5 FY-Amp:I	10 MX-Phase:I	

>plot 1 7 -no

>end

>fr\_cforce II

>REPORT

>vlist

The Variables Available for Selection are:

=====

1 Frequency	6 FY-Phase:II	11 MY-Amp:II
2 Period	7 FZ-Amp:II	12 MY-Phase:II
3 FX-Amp:II	8 FZ-Phase:II	13 MZ-Amp:II
4 FX-Phase:II	9 MX-Amp:II	14 MZ-Phase:II
5 FY-Amp:II	10 MX-Phase:II	

>plot 1 7 -no

>end

>fr\_cforce III

>REPORT

>vlist

The Variables Available for Selection are:

=====

1 Frequency	6 FY-Phase:III	11 MY-Amp:III
2 Period	7 FZ-Amp:III	12 MY-Phase:III
3 FX-Amp:III	8 FZ-Phase:III	13 MZ-Amp:III
4 FX-Phase:III	9 MX-Amp:III	14 MZ-Phase:III
5 FY-Amp:III	10 MX-Phase:III	

>plot 1 7 -no

>end

>fr\_cforce IV

>REPORT

>vlist

The Variables Available for Selection are:

=====

1 Frequency	6 FY-Phase:IV	11 MY-Amp:IV
2 Period	7 FZ-Amp:IV	12 MY-Phase:IV
3 FX-Amp:IV	8 FZ-Phase:IV	13 MZ-Amp:IV
4 FX-Phase:IV	9 MX-Amp:IV	14 MZ-Phase:IV
5 FY-Amp:IV	10 MX-Phase:IV	

>plot 1 7 -no

>end

>

>end\_freq\_response

>

>&finish

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

\* \*\*\* MOSES \*\*\* \*

\* ----- July 16, 2017 \*

\* SPAR (3DDiff By MOSES) \*

\* Draft = 135.0 Meters Trim Angle = 0.00 Deg. \*

\* Roll Gy. Radius = 61.5 Meters Pitch Gy. Radius = 61.5 Meters Yaw Gy. Radius  
= 30.0 Meters \*

\* Heading = 0.00 Deg. Forward Speed = 0.00 Knots Linearization Based  
on 1/ 20 \*

\* \*

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

### +++ MOTION RESPONSE OPERATORS +++

=====

Results are in Body System

Of Point On Body SPAR At X = 0.0 Y = 0.0 Z = 62.0

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

ENCOUNTER	Surge /	Sway /	Heave /	Roll /	Pitch /	Yaw
	Wave Ampl.	Wave Ampl.	Wave Ampl.	Wave Ampl.	Wave Ampl.	
	Wave Ampl.	Wave Ampl.				
Frequency	Period	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase	
		Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase	
0.1571	40.00	0.834 90	0.000 0	0.091 0	0.000 0	1.013 -89
			0.000 0			
0.1795	35.00	0.609 90	0.000 0	0.085 0	0.000 0	0.902 -89
			0.000 0			
0.2094	30.00	0.380 90	0.000 0	0.075 0	0.000 0	0.851 -89
			0.000 0			
0.2513	25.00	0.081 90	0.000 0	0.059 0	0.000 0	0.943 -89
			0.000 0			
0.3142	20.00	0.739 -90	0.000 0	0.037 0	0.000 0	1.625 -90
			0.000 0			
0.3307	19.00	1.392 -91	0.000 0	0.032 0	0.000 0	2.415 -91
			0.000 0			
0.3491	18.00	5.053 -96	0.000 0	0.027 0	0.000 0	7.344 -96
			0.000 0			
0.3696	17.00	4.176 96	0.000 0	0.022 1	0.000 0	5.310 96
			0.000 0			

0.3927	16.00	1.584	93	0.000	0	0.018	1	0.000	0	1.828	93
				0.000	0						
0.4189	15.00	0.957	92	0.000	0	0.013	1	0.000	0	1.044	92
				0.000	0						
0.4333	14.50	0.804	92	0.000	0	0.011	1	0.000	0	0.858	92
				0.000	0						
0.4488	14.00	0.688	91	0.000	0	0.010	1	0.000	0	0.724	91
				0.000	0						
0.4654	13.50	0.597	91	0.000	0	0.008	1	0.000	0	0.624	91
				0.000	0						
0.4833	13.00	0.512	91	0.000	0	0.007	2	0.000	0	0.540	91
				0.000	0						
0.5027	12.50	0.451	91	0.000	0	0.005	2	0.000	0	0.477	91
				0.000	0						
0.5236	12.00	0.398	91	0.000	0	0.004	2	0.000	0	0.425	91
				0.000	0						
0.5712	11.00	0.303	91	0.000	0	0.002	3	0.000	0	0.341	91
				0.000	0						
0.5984	10.50	0.268	90	0.000	0	0.002	4	0.000	0	0.308	90
				0.000	0						
0.6283	10.00	0.236	90	0.000	0	0.001	4	0.000	0	0.278	90
				0.000	0						
0.6614	9.50	0.207	89	0.000	0	0.001	5	0.000	0	0.250	89
				0.000	0						
0.6981	9.00	0.181	89	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.224	89
				0.000	0						
0.7392	8.50	0.156	88	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.200	88
				0.000	0						
0.7854	8.00	0.134	86	0.000	0	0.013	-170	0.000	0	0.176	86
				0.000	0						
0.8378	7.50	0.113	85	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.153	85
				0.000	0						
0.8976	7.00	0.094	83	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.130	83
				0.000	0						
0.9666	6.50	0.075	80	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.106	80
				0.000	0						
1.0472	6.00	0.057	78	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.083	78
				0.000	0						
1.1424	5.50	0.041	76	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.060	76
				0.000	0						
1.2566	5.00	0.027	78	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.041	78
				0.000	0						
1.3963	4.50	0.016	84	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.025	84
				0.000	0						
1.5708	4.00	0.009	98	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.014	98
				0.000	0						
2.0944	3.00	0.001	155	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.002	154
				0.000	0						

+++CONNECTOR FORCE RESPONSE OPERATORS+++  
=====

### For The Element I

ENCOUNTER		FX /		FY /		FZ /		MX /		MY /		MZ /	
		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.	
Frequency	Period	Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.	
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase
0.1571	40.00	16.35	-89	16.26	90	52.62	48	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.1795	35.00	24.01	-89	23.88	90	47.72	46	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.2094	30.00	36.41	-89	36.23	90	43.65	48	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.2513	25.00	64.47	-89	64.14	90	42.95	57	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3142	20.00	173.33	-90	172.45	89	64.23	76	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3307	19.00	278.41	-91	277.00	88	93.85	81	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3491	18.00	904.42	-96	899.84	83	282.86	81	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3696	17.00	690.95	96	687.46	-83	204.45	-80	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3927	16.00	248.27	93	247.01	-86	70.59	-81	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4189	15.00	145.52	92	144.78	-87	40.42	-80	0.00	0	0.00	0	0.00	0

0.4333	14.50	120.82	92	120.21	-87	33.23	-80	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.4488	14.00	102.61	91	102.09	-88	28.01	-80	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.4654	13.50	88.67	91	88.23	-88	24.09	-80	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.4833	13.00	76.45	91	76.06	-88	20.83	-81	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.5027	12.50	67.46	91	67.12	-88	18.37	-82	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.5236	12.00	59.84	91	59.53	-88	16.34	-83	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.5712	11.00	46.85	91	46.61	-88	13.05	-85	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.5984	10.50	41.88	90	41.66	-89	11.76	-86	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.6283	10.00	37.37	90	37.18	-89	10.61	-87	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.6614	9.50	33.26	89	33.09	-90	9.55	-88	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.6981	9.00	29.47	89	29.32	-90	8.56	-89	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.7392	8.50	25.93	88	25.80	-91	7.62	-90	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.7854	8.00	22.59	86	22.48	-93	9.18	-124	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.8378	7.50	19.40	85	19.30	-94	5.86	-94	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.8976	7.00	16.28	83	16.20	-96	4.97	-96	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.9666	6.50	13.21	80	13.15	-99	4.07	-99	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
1.0472	6.00	10.21	78	10.16	-101	3.18	-101	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
1.1424	5.50	7.37	76	7.34	-103	2.32	-103	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
1.2566	5.00	4.91	78	4.89	-101	1.56	-101	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
1.3963	4.50	2.99	84	2.98	-95	0.95	-95	0.00	0	0.00	0
				0							
1.5708	4.00	1.65	98	1.65	-81	0.53	-81	0.00	0	0.00	0
				0							
2.0944	3.00	0.20	155	0.20	-24	0.07	-25	0.00	0	0.00	0
				0							



\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

\* \*\*\* MOSES \*\*\* \*

\* ----- July 16, 2017 \*

\* SPAR (3DDiff By MOSES) \*

\* Draft = 135.0 Meters Trim Angle = 0.00 Deg. \*

\* Roll Gy. Radius = 61.5 Meters Pitch Gy. Radius = 61.5 Meters Yaw Gy. Radius  
= 30.0 Meters \*

\* Heading = 0.00 Deg. Forward Speed = 0.00 Knots Linearization Based  
on 1/ 20 \*

\* \*

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

+++ CONNECTOR FORCE RESPONSE OPERATORS +++

=====

===

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

For The Element II

ENCOUNTER		FX /	FY /	FZ /	MX /	MY /	MZ /				
-----		Wave Ampl.	Wave Ampl.	Wave Ampl.	Wave Ampl.	Wave Ampl.	Wave Ampl.				
		Wave Ampl.	Wave Ampl.								
Frequency	Period	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase
		Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase
0.1571	40.00	16.35	-89	16.26	-89	52.56	-47	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.1795	35.00	24.01	-89	23.88	-89	47.64	-45	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.2094	30.00	36.41	-89	36.23	-89	43.53	-47	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.2513	25.00	64.47	-89	64.14	-89	42.73	-57	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.3142	20.00	173.33	-90	172.45	-90	63.60	-77	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.3307	19.00	278.41	-91	277.00	-91	92.90	-83	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.3491	18.00	904.42	-96	899.85	-96	280.18	-94	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.3696	17.00	690.95	96	687.45	96	202.77	94	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.3927	16.00	248.27	93	247.02	93	70.15	87	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						

0.4189	15.00	145.52	92	144.78	92	40.27	84	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.4333	14.50	120.82	92	120.21	92	33.15	84	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.4488	14.00	102.61	91	102.09	91	27.98	84	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.4654	13.50	88.67	91	88.23	91	24.09	84	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.4833	13.00	76.45	91	76.06	91	20.86	84	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.5027	12.50	67.46	91	67.12	91	18.43	85	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.5236	12.00	59.84	91	59.53	91	16.40	85	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.5712	11.00	46.85	91	46.61	91	13.12	87	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.5984	10.50	41.88	90	41.66	90	11.83	87	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.6283	10.00	37.37	90	37.18	90	10.67	88	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.6614	9.50	33.26	89	33.09	89	9.60	88	0.00	0	0.00	0
				0							0.00
0.6981	9.00	29.47	89	29.32	89	8.61	87	0.00	0	0.00	0
				0							0.00
0.7392	8.50	25.93	88	25.80	88	7.67	87	0.00	0	0.00	0
				0							0.00
0.7854	8.00	22.59	86	22.48	86	7.41	127	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.8378	7.50	19.40	85	19.30	85	5.85	85	0.00	0	0.00	0
				0							0.00
0.8976	7.00	16.28	83	16.20	83	4.97	83	0.00	0	0.00	0
				0							0.00
0.9666	6.50	13.21	80	13.15	80	4.08	80	0.00	0	0.00	0
				0							0.00
1.0472	6.00	10.21	78	10.16	78	3.18	78	0.00	0	0.00	0
				0							0.00
1.1424	5.50	7.37	76	7.34	76	2.32	76	0.00	0	0.00	0
				0							0.00
1.2566	5.00	4.91	78	4.89	78	1.56	78	0.00	0	0.00	0
				0							0.00
1.3963	4.50	2.99	84	2.98	84	0.96	84	0.00	0	0.00	0
				0							0.00
1.5708	4.00	1.65	98	1.65	98	0.53	98	0.00	0	0.00	0
				0							0.00
2.0944	3.00	0.20	155	0.20	155	0.07	154	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
1.5708	4.00	2.33	98	2.33	98	0.75	98	0.00	0	0.00	0
				0							0.00



0.3696	17.00	690.95	96	687.46	-83	202.77	94	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.3927	16.00	248.27	93	247.01	-86	70.15	87	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.4189	15.00	145.52	92	144.78	-87	40.27	84	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.4333	14.50	120.82	92	120.21	-87	33.15	84	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.4488	14.00	102.61	91	102.09	-88	27.98	84	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.4654	13.50	88.67	91	88.23	-88	24.09	84	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.4833	13.00	76.45	91	76.06	-88	20.86	84	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.5027	12.50	67.46	91	67.12	-88	18.43	85	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.5236	12.00	59.84	91	59.53	-88	16.40	85	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.5712	11.00	46.85	91	46.61	-88	13.12	87	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.5984	10.50	41.88	90	41.66	-89	11.83	87	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.6283	10.00	37.37	90	37.18	-89	10.67	88	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.6614	9.50	33.26	89	33.09	-90	9.60	88	0.00	0	0.00	0
				0							
0.6981	9.00	29.47	89	29.32	-90	8.61	87	0.00	0	0.00	0
				0							
0.7392	8.50	25.93	88	25.80	-91	7.67	87	0.00	0	0.00	0
				0							
0.7854	8.00	22.59	86	22.48	-93	7.41	127	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.8378	7.50	19.40	85	19.30	-94	5.85	85	0.00	0	0.00	0
				0							
0.8976	7.00	16.28	83	16.20	-96	4.97	83	0.00	0	0.00	0
				0							
0.9666	6.50	13.21	80	13.15	-99	4.08	80	0.00	0	0.00	0
				0							
1.0472	6.00	10.21	78	10.16	-101	3.18	78	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
1.1424	5.50	7.37	76	7.34	-103	2.32	76	0.00	0	0.00	0
				0							
1.2566	5.00	4.91	78	4.89	-101	1.56	78	0.00	0	0.00	0
				0							
1.3963	4.50	2.99	84	2.98	-95	0.96	84	0.00	0	0.00	0
				0							
1.5708	4.00	1.65	98	1.65	-81	0.53	98	0.00	0	0.00	0
				0							

2.0944 3.00 0.20 155 0.20 -24 0.07 154 0.00 0 0.00 0 0.00  
0

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

```

*                                     *** MOSES ***                                     *
*                                     -----                                     *
*                                     July 16, 2017                                     *
*   SPAR (3DDiff By MOSES)                                                     *
*                                     *                                                     *
* Draft      = 135.0 Meters   Trim Angle   = 0.00 Deg.                                     *
* Roll Gy. Radius = 61.5 Meters   Pitch Gy. Radius = 61.5 Meters   Yaw Gy. Radius
*                                     = 30.0 Meters *
* Heading     = 0.00 Deg.   Forward Speed = 0.00 Knots   Linearization Based
*                                     on 1/ 20 *
*                                     *                                                     *
*                                     *                                                     *

```

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

### +++ CONNECTOR FORCE RESPONSE OPERATORS +++

=====

===

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

For The Element IV

ENCOUNTER	FX /	FY /	FZ /	MX /	MY /	MZ /
-----	Wave Ampl.	Wave Ampl.	Wave Ampl.	Wave Ampl.	Wave Ampl.	
	Wave Ampl.	Wave Ampl.				
Frequency	Period	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/
		-----/				
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase
		Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase
0.1571	40.00	16.35 -89	16.26 -89	52.62 48	0.00 0	0.00 0
			0.00 0			
0.1795	35.00	24.01 -89	23.88 -89	47.72 46	0.00 0	0.00 0
			0.00 0			
0.2094	30.00	36.41 -89	36.23 -89	43.65 48	0.00 0	0.00 0
			0.00 0			
0.2513	25.00	64.47 -89	64.14 -89	42.95 57	0.00 0	0.00 0
			0.00 0			
0.3142	20.00	173.33 -90	172.45 -90	64.23 76	0.00 0	0.00 0
			0.00 0			
0.3307	19.00	278.41 -91	277.00 -91	93.85 81	0.00 0	0.00 0
			0.00 0			
0.3491	18.00	904.42 -96	899.85 -96	282.87 81	0.00 0	0.00 0
			0.00 0			

0.3696	17.00	690.95	96	687.45	96	204.45	-80	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.3927	16.00	248.27	93	247.02	93	70.59	-81	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.4189	15.00	145.52	92	144.78	92	40.42	-80	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.4333	14.50	120.82	92	120.21	92	33.23	-80	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.4488	14.00	102.61	91	102.09	91	28.01	-80	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.4654	13.50	88.67	91	88.23	91	24.09	-80	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.4833	13.00	76.45	91	76.06	91	20.83	-81	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.5027	12.50	67.46	91	67.12	91	18.37	-82	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.5236	12.00	59.84	91	59.53	91	16.34	-83	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.5712	11.00	46.85	91	46.61	91	13.05	-85	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.5984	10.50	41.88	90	41.66	90	11.76	-86	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.6283	10.00	37.37	90	37.18	90	10.61	-87	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.6614	9.50	33.26	89	33.09	89	9.55	-88	0.00	0	0.00	0
				0							
0.6981	9.00	29.47	89	29.32	89	8.56	-89	0.00	0	0.00	0
				0							
0.7392	8.50	25.93	88	25.80	88	7.62	-90	0.00	0	0.00	0
				0							
0.7854	8.00	22.59	86	22.48	86	9.18	-124	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
0.8378	7.50	19.40	85	19.30	85	5.86	-94	0.00	0	0.00	0
				0							
0.8976	7.00	16.28	83	16.20	83	4.97	-96	0.00	0	0.00	0
				0							
0.9666	6.50	13.21	80	13.15	80	4.07	-99	0.00	0	0.00	0
				0							
1.0472	6.00	10.21	78	10.16	78	3.18	-101	0.00	0	0.00	0
				0.00	0						
1.1424	5.50	7.37	76	7.34	76	2.32	-103	0.00	0	0.00	0
				0							
1.2566	5.00	4.91	78	4.89	78	1.56	-101	0.00	0	0.00	0
				0							
1.3963	4.50	2.99	84	2.98	84	0.95	-95	0.00	0	0.00	0
				0							
1.5708	4.00	1.65	98	1.65	98	0.53	-81	0.00	0	0.00	0
				0							

2.0944 3.00 0.20 155 0.20 155 0.07 -25 0.00 0 0.00 0 0.00  
0

## BIODATA PENULIS



Salman Yanuar Dwisatya lahir di kota Surabaya pada tanggal 9 Januari 1995. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SDN Bluru Kidul 1 Sidoarjo, SMP Al-Falah Deltasari Waru Sidoarjo, SMAN 1 Sidoarjo. Setelah lulus dari sekolah menengah, penulis melanjutkan pendidikan nya di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Selama di perkuliahan, penulis aktif dalam organisasi sebagai Staff Divisi Logistik Society of Petroleum Engineer 2015-2016, dan Kepala Departemen Operasional SPE ITS SC 2016-2017. Selain itu, penulis juga aktif dalam berbagai kepanitiaan di acara kampus khususnya di bidang kelautan dan perminyakan. Selain itu, penulis mendapat kesempatan untuk menjadi Pengurus Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS 2016/2017. Pada tahun 2016, penulis berkesempatan melaksanakan kerja praktek di PT. Pertamina Hulu Energi Offshore North West Java pada Departemen *Engineering* dan *Integrity* selama dua bulan. Selama masa studi Strata 1 yang ditempuh selama empat tahun, penulis tertarik dalam bidang hidrodinamika lepas pantai. Sehingga dalam mata kuliah Tugas Akhir ini penulis mengambil topik tentang olah gerak dan dinamika tegangan bangunan laut terapung SPAR. Tugas akhir ini dilakukan dengan metode analitis, numerik dan juga eksperimen di Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS.

Email : salmanyauar@gmail.com